



Universidade da Beira Interior  
Departamento de Ciências Aeroespaciais

# Impacto de Baixa Velocidade em Estruturas Sandwich à Base de Cortiça

Cláudia Patrícia Zeferino Nunes

Dissertação para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Aeronáutica

Covilhã, Agosto 2009

# Agradecimentos

Gostaria de expressar a minha gratidão ao meu orientador, Professor Doutor José Miguel Silva, pela oportunidade de trabalhar sob a sua supervisão e pelo valioso apoio, colaboração e suporte ao longo da elaboração deste trabalho.

Agradeço também o excelente contributo e disponibilidade do Professor Doutor Paulo Fael, imprescindíveis para a conclusão desta tese.

Pretendo manifestar ainda o meu apreço ao Professor Doutor Tessaleno Devezas e ao Professor Doutor Abílio Silva, pela sua cooperação durante o desenvolvimento deste trabalho.

Um agradecimento especial ao Eng. Carlos Coelho, do Instituto Politécnico de Tomar, e à Eng. Ana Paula Gomes, do Centro de Óptica da UBI, por todo o suporte técnico e o tempo dispendido durante a fase de testes.

Gostaria também de agradecer ao Sr. Rui Paulo, técnico do laboratório do Departamento de Ciências Aeroespaciais, pela colaboração técnica na manufactura e processamento dos materiais testados. No mesmo âmbito, estou igualmente muito grata ao colega e amigo João Felício.

Ao Luís, o meu profundo agradecimento pela preciosa ajuda na execução deste trabalho, mas sobretudo pelo carinho e alento que sempre me dispensou.

Finalmente uma palavra de muita gratidão aos meus pais e irmã por todo o amor e compreensão, sem os quais seria impossível a realização deste objectivo. Agradeço ainda, o especial contributo do meu pai na construção dos moldes necessários ao processo de manufactura dos materiais testados.

A todos os que, directa ou indirectamente, me ajudaram a concluir esta dissertação, expresso o meu mais sentido agradecimento.

# Resumo

Os componentes tipo sandwich têm alcançado uma vasta aceitação em aplicações estruturais, devido às suas vantagens relativamente a outros materiais em termos de melhoria de estabilidade, elevada rigidez e resistência específicas. Os compósitos à base de aglomerados de cortiça apresentam-se como uma das alternativas mais promissoras aos materiais sintéticos para a construção de estruturas sandwich. Além das suas características estruturais únicas que permitem, entre outros aspectos, uma melhor performance na tolerância ao dano em solicitações de impacto, isolamento térmico, acústico e vibrático, a cortiça possui inegáveis vantagens ambientais – é um material sustentável, ecológico, natural e reciclável -, tendo um excelente potencial ao nível da diminuição do impacto ambiental, nomeadamente no contexto da indústria aeronáutica.

O cerne deste trabalho consiste na avaliação do desempenho mecânico de estruturas sandwich em carbono/aglomerados de cortiça sujeitas a cargas de impacto, englobando duas áreas distintas: resistência ao impacto e tolerância ao dano. Neste sentido, foram efectuados ensaios de impacto de baixa velocidade com o objectivo de compreender o comportamento das estruturas sandwich face a solicitações dinâmicas. A posterior caracterização da resistência residual das estruturas sandwich carbono/cortiça foi obtida através de ensaios de flexão em quatro pontos. A quantificação da extensão do dano foi corroborada através de observações fotográficas da superfície de dano, após um conveniente processo de edição de imagem.

Os resultados obtidos permitem concluir que os compósitos à base de cortiça apresentam vantagens evidentes sobre outro tipo de materiais usualmente utilizados em núcleos de componentes do tipo sandwich em aplicações aeronáuticas.

**Palavras-chave:** estruturas sandwich, aglomerados de cortiça, resistência ao impacto, tolerância ao dano, extensão do dano.

# Abstract

Sandwich components have gained a major acceptance in structural applications due to its advantages when compared to other materials in terms of stability and high specific rigidity and strength. Cork agglomerate based composites are one of the most promising alternatives to synthetic materials for sandwich structures construction. Cork has unique natural structural properties which allow, among other aspects, a better performance regarding damage tolerance due to impact loads, thermal and acoustical insulation and vibration suppression. Additionally, cork is an eco-friendly material that can be recycled, having a great potential in terms of environmental impact, namely in aerospace industry applications.

The scope of this work is to evaluate the mechanical performance of sandwiches made of carbon faces and cork core when subjected to impact loads. Two distinct areas were included: impact strength and damage tolerance. Low speed impact tests were performed in order to understand the behavior of sandwich structures due to dynamic loads. Furthermore, residual strength characterization of the carbon/cork sandwiches was obtained through four point bending testing. Damage extension quantification was complemented through photography observations after an adequate image editing process.

The obtained results allow concluding that cork based composites show evident advantages relatively to other types of core materials commonly used in sandwich components for aerospace applications.

**Keywords:** Sandwich structures, cork agglomerate, impact strength, damage tolerance, damage extension.

# Conteúdo

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	ii
Abstract .....	iii
Conteúdo .....	iv
Lista de Figuras .....	vi
Lista de Tabelas.....	ix
Capítulo 1 .....	1
Introdução.....	1
1.1 Contextualização e objectivos do trabalho .....	1
1.2 Metodologia da investigação .....	2
1.3 Estrutura da tese .....	3
Capítulo 2.....	5
Revisão bibliográfica.....	5
2.1 Eventos de impacto .....	6
2.1.1 Classificação do impacto.....	6
2.2 Resistência ao impacto.....	8
2.3 Modos de falha em estruturas sandwich .....	12
2.3.1 Técnicas para avaliação do dano provocado por impacto.....	13
2.4 Tolerância ao dano .....	14
Capítulo 3 .....	17
Material, equipamento e metodologia experimental .....	17
3.1 Descrição do processo de fabrico dos provetes sandwich .....	17
3.1.1 Provetes sandwich com núcleo de cortiça.....	18
3.1.2 Provetes sandwich com núcleo de Rohacell® .....	22
3.2 Descrição de equipamento de ensaio .....	23
3.3 Metodologia experimental .....	25
3.3.1 Considerações relativas à geometria dos provetes .....	25
3.3.2 Ensaio de impacto de baixa velocidade .....	26
3.3.3 Ensaio de flexão em quatro pontos .....	27

3.3.4 Método de observação e quantificação do dano.....	32
Capítulo 4 .....	34
Análise experimental: resultados e discussão.....	34
4.1 Ensaio de resistência ao impacto .....	34
4.1.1 Nível de Energia – 5J .....	36
4.1.2 Nível de Energia – 10 J .....	39
4.1.3 Nível de Energia – 15J .....	40
4.1.4 Nível de Energia – 20 J .....	41
4.1.5 Historial de forças e balanço energético .....	43
4.2 Ensaio de avaliação de resistência residual (flexão) .....	46
4.2.1 Comportamento das estruturas sandwich à flexão .....	46
4.2.2 Mecanismos de falha.....	48
4.2.3. Carga máxima e tensão de corte.....	50
4.3 Análise e caracterização do dano .....	54
4.3.1 Dano nas faces.....	54
4.3.2 Dano no núcleo.....	57
Capítulo 5 .....	61
Conclusões e desenvolvimentos futuros.....	61
Referências bibliográficas .....	63
Anexos.....	67
A.1. Características do tecido de carbono.....	67
A.2. Ficha técnica da resina epoxy .....	67
A.3. Propriedades físicas e mecânicas da espuma rígida Rohacell® 71 WF.....	70
A.4. Esquematização das dimensões dos provetes sandwich .....	71
A.5. Resultados gráficos dos ensaios de impacto .....	72

# Lista de Figuras

Fig. 1 – a) Aparato de queda de peso: (1) ímã , (2) impactor, (3) suporte, (4) provete de teste. b) Sistema de pressão de ar: (1) filtro de ar, (2) regulador de pressão, (3) tanque de ar, (4) válvula, (5) tubo, (6) sensor de velocidade, (7) provete de teste. c) Sistema tipo pêndulo: (1) impactor, (2) suporte do provete, (3) provete de teste. ....	6
Fig. 2 – Classificação dos tipos de resposta de impacto .....	7
Fig. 3 – Tipos de resposta de impacto: (a) Resposta típica de impactos de baixa velocidade ou quasi-estático, ( b) Resposta típica de impactos de elevada velocidade .....	8
Fig. 4 – Dano de impacto realizado em (a) Fibra de carbono, (b) Kevlar, (c) Híbrido.....	10
Fig. 5 – Diferentes tipos de danos de impacto em estruturas sandwich.....	13
Fig. 6 – Molde usado no processo de fabrico dos provetes sandwich .....	18
Fig. 7 – Etapas de fabrico dos constituintes sandwich: (a) Laminagem manual das faces, (b) Preparação do aglomerado de cortiça/epoxy.....	19
Fig. 8 - Etapas de empilhamento dos constituintes sandwich no molde: (a) Colocação da face inferior, (b) Introdução do aglomerado de cortiça, (c) Colocação da face superior .....	19
Fig. 9 – Etapas finais do processo de construção dos provetes sandwich: (a) Compactação, (b) Cura na estufa.....	20
Fig. 10 – Provetes sandwich carbono/aglomerado de cortiça .....	21
Fig. 11 – Provetes sandwich carbono/Rohacell® .....	22
Fig. 12 – Máquina de ensaios de impacto IMATEK-IM10 .....	24
Fig. 13 – Máquina de ensaios universal Instron, modelo 1341 .....	24
Fig. 14 – Esquema representativo da janela de impacto e das dimensões gerais do provete.....	27
Fig. 15 – Nomenclatura das dimensões de espessura da sandwich.....	28
Fig. 16 - Esquema do ensaio de flexão a quatro pontos, com os travessões móveis a uma distância dos suportes igual a 1/3 do vão .....	29
Fig. 17 – Acessórios usados nos ensaios de flexão .....	31
Fig. 18 – Avaliação da extensão do dano com o auxílio do software LEICA MW .....	33
Fig. 19 – Curvas de força-tempo a 5 J de energia de impacto: (a) Sandwich carbono/cortiça-20 mm, (b) Sandwich carbono/cortiça-30mm.....	35
Fig. 20 – Curvas de força-tempo a 5 J de energia de impacto: (a) Sandwich carbono/cortiça-30 mm, (b) Sandwich carbono/Rohacell® .....	37

Fig. 21 - Curvas de força-deslocamento a 5 J de energia de impacto: (a) Sandwich carbono/cortiça-30 mm, (b) Sandwich carbono/Rohacell® .....	38
Fig. 22 - Curvas de energia- tempo a 5 J de energia de impacto: (a) Sandwich carbono/cortiça-30 mm, (b) Sandwich carbono/Rohacell® .....	39
Fig. 23 - Curvas de força-deslocamento a 10 J de energia de impacto: (a) Sandwich carbono/cortiça-30 mm, (b) Sandwich carbono/Rohacell® .....	40
Fig. 24 - Curvas de força-tempo a 15 J de energia de impacto: (a) Sandwich carbono/cortiça-30 mm, (b) Sandwich carbono/Rohacell® .....	41
Fig. 25 - Curvas de força-deslocamento a 20 J de energia de impacto: (a) Sandwich carbono/cortiça-30 mm, (b) Sandwich carbono/Rohacell® .....	42
Fig. 26 - Curvas de energia-tempo a 20 J de energia de impacto: (a) Sandwich carbono/cortiça-30 mm, (b) Sandwich carbono/Rohacell® .....	42
Fig. 27 - Curvas de deslocamento-tempo a 20 J de energia de impacto: (a) Sandwich carbono/cortiça-30 mm, (b) Sandwich carbono/Rohacell® .....	43
Fig. 28 - Historial da força para cada tipo de material, em função do nível de energia de impacto .....	44
Fig. 29 - Balanço da energia nas estruturas sandwich carbono/cortiça de 20 mm de espessura ..	45
Fig. 30 - Balanço da energia nas estruturas sandwich carbono/cortiça de 30 mm de espessura...	45
Fig. 31 - Balanço da energia nas estruturas sandwich carbono/Rohacell® .....	46
Fig. 32 - Comportamento típico à flexão das estruturas sandwich à base de cortiça .....	47
Fig. 33 - Comportamento típico à flexão das estruturas sandwich carbono/Rohacell® .....	47
Fig. 34 - Etapas de carregamento à flexão de estruturas sandwich à base de cortiça: (a) Início do carregamento, (b) Deformação ao corte do núcleo com início de falha, (c) Progressão da falha ao corte do núcleo .....	48
Fig. 35 - Mecanismos de falha das estruturas sandwich carbono/Rohacell®: (a) Falha por corte do núcleo na zona de impacto, (b) Falha por corte na região de contacto com o actuador, (c) Falha na interface face-núcleo.....	49
Fig. 36 - Historial da força máxima nos provetes carbono/cortiça com 20 mm de espessura nominal.....	51
Fig. 37 - Historial da força máxima nos provetes carbono/cortiça com 30 mm de espessura nominal.....	52
Fig. 38 - Historial da tensão de corte máxima nos provetes carbono/cortiça com 20 mm de espessura nominal .....	53
Fig. 39 - Historial da tensão de corte máxima nos provetes carbono/cortiça com 30 mm de espessura nominal .....	54
Fig. 40 - Dano nas faces .....	56



Fig. 41 – Área de dano nas faces.....	57
Fig. 42 - Dano no núcleo .....	58
Fig. 43 – Área de dano no núcleo.....	59
Fig. 44 – Profundidade do dano no núcleo.....	60

# Lista de Tabelas

Tabela 1 - Resumo dos parâmetros usados no fabrico dos provetes sandwich carbono/cortiça...	21
Tabela 2 – Código de nomenclatura dos provetes sandwich .....	26
Tabela 3 – Mecanismos de falha de estruturas sandwich.....	30
Tabela 4 – Principais dimensões dos provetes inerentes aos ensaios de flexão.....	32

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Contextualização e objectivos do trabalho

Durante a vida de uma estrutura, impactos causados por objectos estranhos podem ocorrer em operações de fabrico, serviço e manutenção de uma aeronave. Nas manobras de descolagem e aterragem, pedras e outros pequenos detritos existentes na pista podem ser projectados a elevada velocidade pelos pneus contra a estrutura. De igual modo, durante o processo de fabrico e manutenção, os componentes da aeronave podem ser sujeitos à queda de ferramentas, provocando dano na estrutura. O dano por impacto, designadamente em estruturas em compósito, é usualmente o tipo de dano mais prejudicial e pode ameaçar a integridade das estruturas de aeronaves, mesmo que este seja pouco visível.

Neste sentido, tem havido uma preocupação crescente em desenvolver novos materiais/estruturas que tenham um bom comportamento ao impacto. Os aglomerados de cortiça integram o conjunto destes materiais que tem sido alvo de diversos trabalhos de investigação. Particularmente e, no âmbito das actividades do Departamento de Ciências Aeroespaciais da Universidade da Beira Interior, foram recentemente desenvolvidos alguns trabalhos preliminares de caracterização de compósitos à base de cortiça [1,2].

A cortiça é um precioso recurso natural. É gerador de riqueza e é um símbolo da economia nacional. Portugal é líder incontestável na produção e transformação de cortiça, responsável por 60% da sua produção mundial, destinando-se cerca de 90% da matéria-prima, maioritariamente transformada, ao mercado externo [3]. As aplicações deste material são conhecidas desde a Antiguidade, algumas delas, desde logo relacionadas com a construção, mas sobretudo como vedante [4]. É importante salientar que, actualmente, a aplicação da cortiça vai ao encontro de sectores tão exigentes como a indústria aeroespacial, automóvel, de construção civil e de confecção.

Sendo considerada um material estratégico utilizado para múltiplas aplicações, a cortiça possui uma estrutura e composição química que lhe conferem um conjunto de qualidades únicas. É um excelente isolante térmico, acústico e vibrático. Propriedades como resistência à compressão devido à sua elevada elasticidade, baixa densidade, grande capacidade de absorção de energia (em impacto) e dissipação de energia (em vibrações), baixa condutividade térmica, elevado coeficiente de atrito e boa resistência ao fogo tornam a cortiça num material de eleição para aplicações aeroespaciais [5]. A estas vantagens acrescem outras de índole ambiental, uma vez que se trata de um material sustentável, ecológico, natural e reciclável.

Neste contexto, e numa perspectiva particular de aplicabilidade à indústria aeronáutica, onde um dos principais requisitos é obter estruturas com uma elevada razão resistência/peso e excelente tolerância ao dano, este trabalho propõe-se avaliar a viabilidade da implementação de aglomerados de cortiça como material do núcleo em estruturas sandwich com faces de carbono/epoxy, sob o ponto de vista do seu desempenho mecânico face a cargas de impacto de baixa velocidade.

## **1.2 Metodologia da investigação**

A fim de cumprir os objectivos propostos, a presente dissertação engloba dois tipos de ensaios experimentais realizados em estruturas sandwich carbono/aglomerados de cortiça e um método de quantificação do dano, com vista a caracterizar duas áreas distintas: resistência ao impacto e tolerância ao dano. Para efeitos comparativos, foram testadas também estruturas sandwich com núcleo feito num material de referência no domínio aeroespacial, designadamente uma espuma polimérica rígida de baixa densidade. Neste sentido, foram efectuados os seguintes ensaios:

1. Ensaio de resistência ao impacto, de modo a promover um estudo das forças envolvidas e da duração de contacto impactor/provete, do deslocamento do impactor durante o impacto e da energia associada às solicitações inerentes a este tipo de ensaio;
2. Ensaio de flexão em quatro pontos, realizados em estruturas sandwich com e sem dano de impacto, de modo a obter, por comparação, as propriedades mecânicas residuais da estrutura danificada.

3. Quantificação da extensão do dano com recurso à utilização de um software de análise de imagem após registo fotográfico de um conjunto significativo de zonas de dano.

### **1.3 Estrutura da tese**

Após a apresentação dos objectivos e do seu enquadramento, bem como a metodologia da investigação, o presente documento compreende os seguintes capítulos: revisão bibliográfica; material, equipamento e metodologia experimental; análise experimental: resultados e discussão; conclusões e desenvolvimentos futuros.

No capítulo 2, dedicado à revisão bibliográfica, definem-se os conceitos de resistência ao impacto e tolerância ao dano. No que diz respeito à resistência ao impacto, descrevem-se os parâmetros que afectam o dano de impacto, apresentam-se os métodos experimentais para determinação da extensão do dano e faz-se menção aos modelos analíticos que são capazes de prever a reposta de impacto. Faz-se referência às diversas instalações de teste de impacto para simular impactos reais, e classifica-se o impacto em três categorias principais: impacto de baixa velocidade, elevada velocidade e hiper velocidade, desenvolvendo-se uma analogia entre ensaio quasi-estático e impacto de baixa velocidade. Posteriormente, são tratados os modos de falha de estruturas sandwich, dando especial atenção à instabilidade e descoesão entre faces/núcleo. No que concerne à tolerância ao dano, faz-se referência aos tipos de ensaios a realizar para determinação das propriedades mecânicas residuais das estruturas sandwich.

O capítulo 3 abrange a descrição dos materiais e dos equipamentos utilizados. São descritos ainda os processos de fabrico dos provetes sandwich, bem como as características mais importantes inerentes aos ensaios realizados.

No capítulo 4 será efectuada a apresentação e análise de resultados obtidos no decorrer dos ensaios de impacto e flexão, bem como a análise da extensão do dano.

O capítulo 5 destina-se à apresentação das conclusões retiradas a partir da análise de resultados, bem como algumas propostas de desenvolvimento futuro que, em conjunto com esta tese,

permitam obter uma descrição completa das características mecânicas dos aglomerados de cortiça.

## Capítulo 2

# Revisão bibliográfica

A utilização da cortiça associada à indústria aeronáutica, em particular, quando integrada em estruturas sandwich como material do núcleo sob a forma de aglomerados, pode acarretar inúmeras vantagens, nomeadamente ao nível da diminuição do impacto ambiental, já que a cortiça se apresenta como um material sustentável, natural, ecológico e reciclável. Um outro benefício inerente à sua utilização diz respeito à redução de custos comparativamente ao uso de alguns materiais de núcleo convencionais bastante mais dispendiosos. Algumas propriedades da cortiça, particularmente, a sua elasticidade/compressibilidade devido à sua estrutura alveolar tão característica, sugerem que este material possa ser bastante resistente e tolerante ao dano face a eventos de impacto.

A resistência ao impacto é a medida do dano infligido num material/estrutura devido a um evento particular, enquanto que a tolerância ao dano é a medida da capacidade de um material/estrutura em desempenhar as suas funções (dados os requisitos específicos) quando o dano está presente. Nesta investigação, o “evento particular” é traduzido pelo impacto de baixa velocidade e o “requisito de desempenho” pela capacidade de suportar cargas à flexão.

No entanto, a definição de resistência ao impacto e tolerância ao dano é alvo de grande controvérsia. Enquanto alguns autores reconhecem uma delinação entre resistência ao dano e tolerância ao dano, embora usando terminologias ligeiramente diferentes, outros, como por exemplo Bull [6], preferem não adoptar qualquer separação entre estes conceitos, uma vez que a resistência ao impacto está, em grande medida, associada à tolerância ao dano na maioria das aplicações em engenharia.

## 2.1 Eventos de impacto

As condições de teste devem representar os impactos reais para os quais a estrutura é projectada, pelo que a escolha do tipo de ensaios experimentais e equipamentos associados é de extrema importância para validação dos resultados decorrentes. Para simular os vários tipos de impacto são usadas diferentes instalações de teste. De entre os tipos de teste mais usados pelos investigadores, destacam-se os testes por queda de peso [7-11] e os testes de pressão de ar [12, 13], embora muitos detalhes dos aparatos de teste possam diferir.

Os testes de queda de peso são usados para simular impactos de baixa velocidade típicos do problema da queda de ferramentas ou de certo tipo de danos resultantes de impactos com objectos estranhos durante as fases de voo a menor velocidade (descolagem e aterragem). Os sistemas de pressão de ar, no qual um pequeno projectil é propulsionado a alta velocidade, são usados para simular o tipo de impactos encontrados nas fases de voo a maior velocidade. Os sistemas tipo pêndulo são também usados para gerar impactos de baixa velocidade [14]. Os aparatos de teste anteriormente mencionados encontram-se representados na Fig.1.

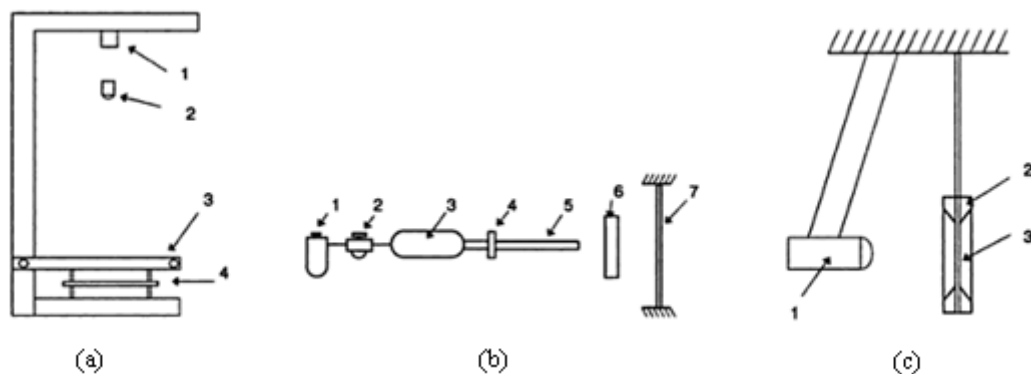


Fig. 1 – a) Aparato de queda de peso: (1) íman , (2) impactor, (3) suporte, (4) provete de teste. b) Sistema de pressão de ar: (1) filtro de ar, (2) regulador de pressão, (3) tanque de ar, (4) válvula, (5) tubo, (6) sensor de velocidade, (7) provete de teste. c) Sistema tipo pêndulo: (1) impactor, (2) suporte do provete, (3) provete de teste [14]

### 2.1.1 Classificação do impacto

Usualmente, o impacto é classificado em duas grandes categorias: impacto de baixa velocidade ou de grande massa e impacto de alta velocidade ou de pequena massa [15]. No entanto, uma classificação mais precisa deverá ter em conta muitos outros parâmetros, tais como a geometria e



as propriedades do material que caracterizam a interação entre o impactor e a amostra. Assim, para além desta classificação, outras têm sido propostas [14, 16].

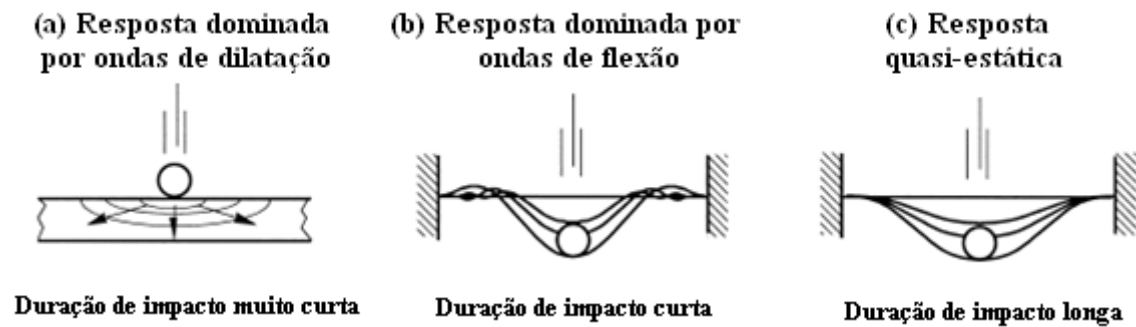


Fig. 2 – Classificação dos tipos de resposta de impacto [18]

Olsson [17-19], por exemplo, dividiu a resposta de impacto em duas frentes, nomeadamente controlada por fronteira e por onda. Esta última, por sua vez, pode ser categorizada em quatro tipos de transferência de onda de tensões induzidas por impacto da seguinte forma: (1) a resposta de impacto de hiper velocidade é dominada pelas ondas de dilatação com uma duração de impacto muito pequena e uma massa do projectil muito baixa; (2) a resposta de impacto de alta velocidade é novamente marcada por ondas de dilatação mas são transversalmente reflectidas várias vezes, ocorrendo com uma duração do tempo de impacto um pouco mais longa e uma massa de impactor maior (Fig. 2a); (3) a resposta de impacto de velocidade intermédia é dominada por ondas de flexão e ondas de corte com uma duração de impacto intermédia e uma massa do impactor intermédia (Fig. 2b); (4) a resposta de impacto de baixa velocidade ou resposta de impacto quasi-estático é uma resposta de impacto controlado pelas condições de fronteira no qual as ondas de flexão e ondas de corte têm tempo suficiente para serem reflectidas muitas vezes pela fronteira do sistema. A resposta de impacto quasi-estático normalmente resulta num dano menor do que outros tipos de resposta de impacto porque homogeneiza as tensões para ter um pico de carga, deflexão e extensão mais ou menos em fase (Fig. 2c). Consequentemente, torna-se crítico controlar a resposta de impacto de uma estrutura em compósito numa maneira quasi-estática, não sendo possível nalguns casos substituir o impacto de baixa velocidade por um ensaio quasi-estático. No entanto, caso esta substituição seja possível, apresenta algumas vantagens, como uma iniciação e propagação do dano mais facilmente detectáveis, deflexão

facilmente medida com grande precisão, e um melhor controlo da força transversal máxima [20]. Schubel et al. [10] comparou o comportamento de impacto de baixa velocidade e impacto quasi-estático de painéis sandwich carbono/espuma PVC, e concluiu que além dos efeitos localizados provocados pelas características de contacto da carga, os resultados foram bastante semelhantes.

O impacto pode ainda ser classificado com base na deformação do painel: deformação completa do painel e deformação localizada numa pequena região em torno do impactor. Para impactos de baixa velocidade, o dano de impacto é afectado pela resposta global do painel. Por outro lado, se a velocidade de impacto exceder um valor crítico, que depende do painel sandwich e do objecto impactor, a resposta global da sandwich terá um efeito reduzido no dano de impacto. O dano será, ao invés, dependente das propriedades locais da sandwich [6]. Estes conceitos estão ilustrados na Fig. 3.

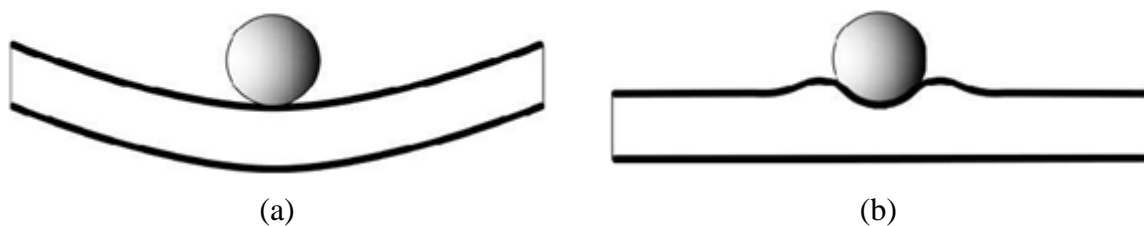


Fig. 3 – Tipos de resposta de impacto: (a) Resposta típica de impactos de baixa velocidade ou quasi-estático, ( b) Resposta típica de impactos de elevada velocidade [6]

## 2.2 Resistência ao impacto

Como já mencionado, a resistência ao impacto está directamente relacionada com a criação de dano devido a um evento de impacto específico [21]. Por outras palavras, é o estudo do dano induzido pelo impacto de objectos estranhos numa estrutura e dos factores que o afectam [14].

Diversos investigadores têm comparado experimentalmente a resistência ao impacto de painéis sandwich em compósito feitos de diferentes materiais [9, 22-24]. Enquanto alguns autores avaliam a resistência ao impacto através da medição da quantidade do dano infligido na estrutura, outros preferem usar como parâmetro avaliador a quantidade de energia absorvida durante o evento de impacto. O material/estrutura pode absorver muita energia de impacto ao promover o dano. Este material/estrutura é muito resistente ao impacto pela segunda definição,

mas não tanto pela primeira [25]. Devido a esta ambiguidade e uma vez que o comportamento de impacto é influenciado por um grande número de parâmetros, os resultados de vários estudos experimentais podem não ser facilmente comparáveis.

São vários os parâmetros que afectam a iniciação e o crescimento do dano de impacto. As propriedades do material, tanto das faces como do núcleo, afectam totalmente a rigidez da estrutura e a rigidez de contacto e, conseqüentemente, terão um efeito significativo na resposta dinâmica da estrutura. As características do impactor – incluindo a sua densidade, propriedades elásticas, forma, tamanho, velocidade inicial, e ângulo de incidência – são outra série de parâmetros a serem considerados. O tamanho do painel sandwich, as suas condições de fronteira e as condições ambientais são factores importantes que têm recebido vários graus de atenção [14, 26].

Os constituintes das faces, fibra e matriz, podem influenciar a resistência ao dano de impacto de painéis sandwich em compósito. Gustin et al. [22] compararam as características de resistência ao impacto das faces de amostras com diferentes combinações de fibra de carbono, Kevlar, híbrido (carbono e Kevlar) e híbrido com carbono, concluindo que as faces constituídas apenas por carbono sofreram maior dano do que as faces com adição de material híbrido em condições de impacto similares, enquanto que as faces contendo Kevlar requerem energias de impacto mais elevadas para obter o mesmo tipo de dano. A Fig. 4, obtida por estes autores, mostra a extensão do dano em três diferentes casos, para um nível de energia de 15 J. A iniciação do dano depende também da espessura das faces. Quando as faces são finas comparadas com a extensão lateral do painel, as deflexões das faces tendem a ser grandes (muitas vezes a espessura da face) e as forças no plano elevadas causam fissuração à tracção. Por sua vez, quando as faces são espessas, as deflexões da face são pequenas (menores que a espessura das faces) e as forças de corte nas regiões que rodeiam o projectil podem ser muito elevadas e causar fissuração ao corte [26].

No presente trabalho, e uma vez que se pretende avaliar especificamente o comportamento do núcleo da sandwich, foi adoptado como parâmetro rígido a utilização de faces idênticas em todos os tipos de provetes ensaiados experimentalmente, as quais foram feitas em material compósito de carbono/epoxy.

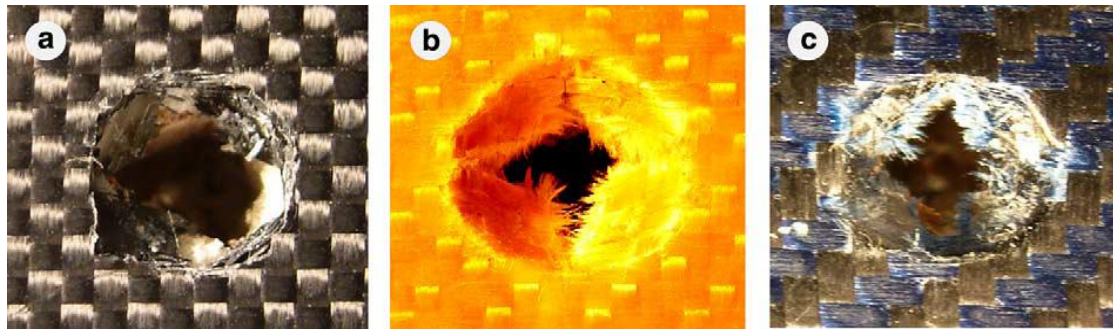


Fig. 4 – Dano de impacto realizado em (a) Fibra de carbono, (b) Kevlar, (c) Híbrido [22]

É esperado que os materiais do núcleo afetem substancialmente as características de iniciação do dano de painéis sandwich porque estes geralmente têm propriedades mecânicas inferiores às das faces devido à sua menor densidade. Assim, o dano do núcleo, que é caracterizado por uma variação substancial na curva carga-deflexão, foi identificado como sendo o primeiro modo de falha em impactos de baixa velocidade em estruturas sandwich do tipo ninho de abelha com uma grande razão de rigidez pele/núcleo [8]. A maioria dos estudos constatou que geralmente o primeiro dano da estrutura aparecia sob a forma de esmagamento do núcleo, antes de qualquer dano nas faces [25, 27]. As propriedades geométricas do núcleo devem também ser tidas em conta na avaliação da resistência ao impacto. Tsang [25] constata que embora o aumento da espessura do núcleo represente um aumento da rigidez à flexão da estrutura sandwich como um todo, acarreta também um maior dano de impacto, uma vez que o painel não absorve eficientemente a energia de impacto por flexão global, resultando numa força de contacto maior entre o impactor e o painel.

De entre os mecanismos para absorção de energia em compósitos sandwich, destacam-se a delaminação e a descolagem entre a face e o núcleo. Para além das propriedades de cada componente da sandwich, a geometria específica do núcleo é também um factor crítico na resistência de colagem com a face. Mais especificamente, a quantidade de área de superfície disponível para colagem entre o núcleo e as faces afecta dramaticamente a distribuição de tensões ao longo do compósito. Os núcleos feitos de ninho de abelha podem exhibir, tipicamente, dificuldades na adesão de colagem à face devido à falta de área de superfície disponível para a colagem. Christopherson et al. [28], no seu estudo de avaliação da resposta de elevada taxa de deformação de estruturas sandwich, utilizaram núcleos de ninho de abelha preenchidos com espuma para diminuir os problemas de colagem descritos anteriormente, fornecendo uma

distribuição de tensões mais favorável através do aumento de área de superfície de colagem e aumentar assim a sua resistência ao impacto. Ainda no que diz respeito à influência da adesão entre o núcleo e a face, Lendze et al. [29], avaliaram a resistência de impacto de estruturas sandwich com núcleo de espuma e faces de vidro/poliéster em termos de eficiência de colagem entre os dois componentes, utilizando dois tipos de adesivos com diferentes densidades. O adesivo de maior densidade levou a uma menor extensão do dano. No entanto, estas amostras sofreram descolagem na interface face/núcleo e fissuração do núcleo a todas as energias de impacto. Pelo contrário, o adesivo de baixa densidade devido à presença de microesferas, fornece maior flexibilidade local levando a um ligeiro aumento na indentação e decréscimo no deslocamento no plano, o que previne a fissuração do núcleo. Segundo Burton et al. [30], o adesivo de junção entre a face e o núcleo necessita ser rígido e resistente, com vista a permitir que a estrutura sandwich sustenha cargas mais elevadas durante uma longa vida de serviço.

Durante os ensaios de impacto, as condições de fronteira dos painéis podem variar. Este factor influencia a iniciação do dano já que o dano é iniciado somente na face superior de painéis rigidamente suportados. No entanto, o dano pode ser iniciado tanto na face superior como inferior quando os painéis são simplesmente suportados ou encastrados. A deformação global do painel pode levar a maiores forças de tracção na face inferior do que na face superior, que está também a sofrer indentação [26].

Alguns trabalhos mencionam o efeito da geometria do impactor na resistência ao dano de impacto de painéis sandwich [6, 25, 26]. Os impactores de cabeça hemisférica e cilindro-cónica produzem normalmente fissuras radiais com origem no ponto de contacto entre o impactor e a face. Por outro lado, impactores arredondados produzem fissuras circunferenciais sob a cabeça do impactor. O material justamente abaixo da cabeça do impactor torna-se comprimido e uma zona de fractura desenvolve-se à volta da periferia do impactor [26]. Segundo a referência [6], Wen et al fazem uma comparação entre três diferentes tipos de impactores: cilíndricos com cabeças plana, cónica e hemisférica, usados no impacto quasi-estático. Verificou-se que o impactor com cabeça plana provocou tensões de corte na face superior, esmagou e provocou tensões de corte no núcleo bem como descolagem entre o núcleo e a face inferior. Os impactores cónicos esmagaram a face superior e o núcleo havendo uma descolagem entre este e a face inferior. Com um impactor hemisférico, o esmagamento do núcleo começou antes da face superior falhar à flexão, o núcleo foi esmagado e a face inferior foi sujeita à flexão até à falha.

Para além da geometria do impactor, o tamanho deste também é importante. Um impactor maior distribui a carga numa área mais extensa, causando assim uma menor concentração de tensões [25]. Um impactor de cabeça hemisférica de grande diâmetro actua como um projectil arredondado com um raio efectivo.

Diversos investigadores desenvolveram modelos analíticos para prever a resposta de impacto de estruturas sandwich em compósito [8, 26, 31, 32]. Entre estes, o modelo massa – mola e o modelo de balanço de energia são os mais utilizados sem esquecer, contudo, que estes modelos só são válidos até à iniciação do dano e são incapazes de modelar a propagação do dano. Foo et al. [8] modificou o modelo de balanço de energia para contemplar a sua validade além do regime elástico. Já Anderson [32] investigou modelos dinâmicos simplificados incorporando dissipação de energia para descrição do historial da força de contacto criada por um impacto de grande massa em estruturas sandwich.

## 2.3 Modos de falha em estruturas sandwich

Geralmente, quando uma estrutura sandwich é sujeita ao impacto, parte da energia associada a este tipo de solicitação é usada na deformação elástica do material e retornada pelo sistema. A energia em excesso é dissipada através de vários mecanismos, tais como a rotura de fibras, descolagem e delaminação fibra-matriz nas faces. Por seu turno, o núcleo dissipa a energia por esmagamento e deformação ao corte [23].

Devido à sua composição, uma estrutura sandwich pode apresentar uma diversidade de modos de falha, conforme constatado por alguns autores [7, 33]. Hildebrand [7], por exemplo, identificou os seguintes:

- **Esmagamento da face** – As faces superior ou inferior falham à compressão ao longo da espessura sob a cabeça do impactor (Fig. 5a).
- **Falha ao corte da face** - As faces superior ou inferior falham localmente ao corte interlaminar próximo das bordas do impactor (Fig. 5b).
- **Falha no plano das faces** – As faces superior ou inferior falham localmente à tracção ou compressão no plano próximo das bordas do impactor (Fig. 5c).

- **Falha à flexão das faces** – As faces superior ou inferior falham localmente à flexão próximo dos bordos do impactor (Fig. 5d).<sup>1</sup>
- **Esmagamento e/ou instabilidade do núcleo** – O material do núcleo é esmagado na direcção da espessura (falha compressiva). Isto pode ser em combinação com a deformação de compressão local (típico de núcleos em ninho de abelha) (Fig. 5e).
- **Falha ao corte do núcleo** – O núcleo falha ao corte próximo do impactor. Em materiais do núcleo frágeis, a falha ao corte pode progredir sobre uma vasta área (Fig. 5f).
- **Delaminação entre a face inferior e núcleo e/ou face superior e núcleo** – Com certos materiais do núcleo, a delaminação entre a face superior e o núcleo pode ocorrer numa fase precoce (Fig. 5g).

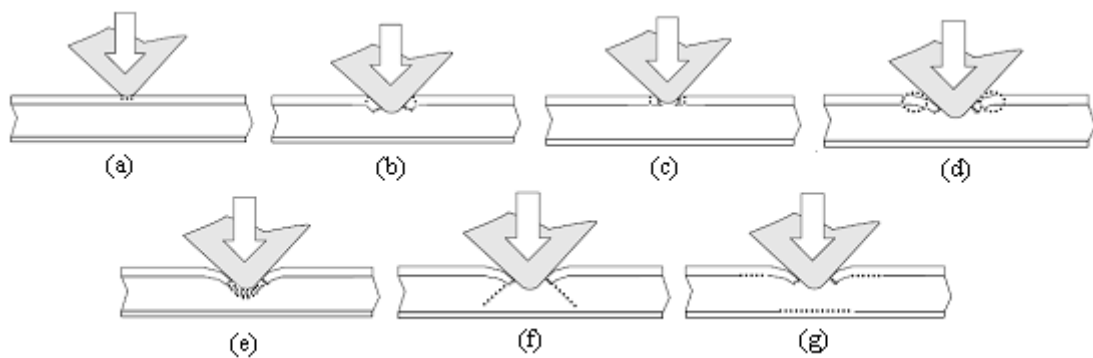


Fig. 5 – Diferentes tipos de danos de impacto em estruturas sandwich [7]

### 2.3.1 Técnicas para avaliação do dano provocado por impacto

Muitas técnicas foram desenvolvidas para determinar a extensão do dano de impacto em estruturas em compósito. Em aplicações onde se procura detectar a presença de dano de impacto, são usadas técnicas não destrutivas que fornecem informação total do campo de observação. Para fins de investigação, quando a localização do impacto é conhecida, os métodos destrutivos fornecem uma informação mais detalhada, mas em contrapartida destroem o espécime durante o processo.

<sup>1</sup> Os primeiros quatro modos de falha são representados na Fig. 5 somente na face superior.

Os métodos não destrutivos de ultrassons e radiografia, designadamente C-scan e raios-X, fornecem uma imagem projectada da zona do dano, sendo úteis na delineação da extensão do dano, razão pelo qual estas técnicas de avaliação são comuns em estudos de impacto em estruturas sandwich [11 e 34]. Embora os métodos de ultrassons e raios-X sejam, usualmente, as duas técnicas mais usadas, outras técnicas têm sido reportadas na literatura [35, 36], como a técnica de batida (tap testing) e a termografia de infravermelhos.

Em alternativa às técnicas não destrutivas, destaca-se a técnica de seccionamento dos provetes para posterior examinação microscópica. Hosur et al. [24], no seu estudo de impacto em estruturas sandwich com faces de carbono e dois diferentes tipos de núcleo à base de espuma (nano-faseada e pura), analisaram a extensão do dano seccionando os provetes em duas metades. Posteriormente, foi efectuado um varrimento utilizando microscópios ópticos e electrónicos, para entender os padrões de falha da estrutura. As amostras com espuma nano-faseada sustiveram maiores cargas e apresentaram menor áreas de dano comparando com as de núcleo de espuma pura. Igualmente, Anderson et al. [37] utilizaram esta técnica para caracterizar o tipo e extensão do dano causado por impacto de baixa velocidade em diversas configurações sandwich com faces de grafite/epoxy e núcleos de espuma e ninho de abelha. Embora o núcleo de espuma de alta densidade e faces mais espessas tenha aumentado a quantidade de energia requerida para gerar dano, o dano foi similar para níveis similares de indentação residual. Já para as amostras de núcleo de ninho de abelha, uma indentação residual de  $0.25\text{ mm}$  indicou níveis significativos de dano interno. Contudo, as superfícies de ambas revelaram dano reduzido a estes níveis de energia de impacto.

## 2.4 Tolerância ao dano

A tolerância ao dano trata da resposta estrutural e integridade associada a um dado estado de dano da estrutura, ou seja, mede a capacidade da estrutura/componente suportar as cargas de serviço na presença do dano. As variáveis a analisar incluem o tipo, extensão e localização do dano [20, 21]. Uma vez que o estado do dano de uma estrutura impactada tenha sido caracterizado, os meios pelos quais tal dano foi infligido na estrutura não são importantes. Apenas o estado do dano é importante no âmbito do tema de tolerância ao dano. A questão relevante num estudo de tolerância ao dano é quanta resistência pode ser retida pela estrutura danificada.



Vários investigadores utilizaram diferentes métodos de teste para avaliar a tolerância ao dano de painéis sandwich. Entre estes métodos estão testes de flexão [27], testes de compressão uniaxial [11, 34, 38], testes de tensão de corte no plano [39], e testes de fadiga [40]. Uma vez que a tolerância ao dano é específica para cada tipo de carregamento, os métodos de teste utilizados pós-impacto têm um efeito preponderante na avaliação da mesma. Contudo, testes de resistência residual diferentes podem, por vezes, produzir modos de falha semelhantes. Por exemplo, testes de flexão com a face danificada no lado que está à compressão usualmente induzem uma linha de fractura ao longo do local do dano, um modo de falha que é também observado em testes de compressão uniaxiais e testes de corte no plano.

Enquanto o dano na face é um factor importante nas capacidades de resistência residual de um componente sandwich, o dano do núcleo pode ser tão ou mais importante, uma vez que este elemento suporta as tensões de corte que atravessam o componente. Nettles [27], no seu estudo, caracterizou, por meio de testes de flexão de quatro pontos, o efeito que o dano do núcleo (ninhos de abelha de alumínio e vidro fenólico) tem na capacidade deste suportar tensões ao corte. Verificou-se, por parte das amostras de vidro fenólico, uma queda acentuada na capacidade de suportar tensões ao corte a um nível de energia de impacto elevado, causando fissuração do núcleo. Por sua vez, o núcleo de alumínio demonstrou um decréscimo muito pequeno na capacidade de suportar tensões ao corte, mesmo a uma escala mais elevada de energias de impacto usadas neste estudo. Mais tarde, Hodge e Nettles [39] determinaram a resistência residual ao corte do mesmo tipo de estruturas através de um novo método, “lap shear test”, tendo comparado os resultados com os testes de flexão realizados anteriormente.

Em investigações recentes, os testes mais usados para avaliar a resistência pós-impacto são os de compressão [11, 38]. Uma explicação para este facto é dada por Bull et al. [34] que refere este modo de carregamento como o mais crítico em estruturas em compósito. No entanto, este tipo de teste necessita de instalações de ensaio complexas, nomeadamente guias anti-flambagem que suportem o espécime para prevenir a ocorrência de dano por instabilidade global do provete [11], razão pela qual não foi uma opção viável para a realização deste trabalho.

Outro factor importante na tolerância ao dano de materiais compósitos é o efeito de uma possível pré-carga aplicada ao provete. Quando um provete em compósito é impactado a um baixo nível de energia posteriormente à aplicação de uma pré-carga, um efeito “atenuador” leva ao aumento

da sua resistência residual compressiva. Por outro lado, se este for impactado a um elevado nível de energia, próximo do ponto de ruptura do componente, ocorre o efeito oposto e o componente pode falhar catastroficamente resultando numa resistência residual compressiva nula [41].

## **Capítulo 3**

# **Material, equipamento e metodologia experimental**

As construções sandwich oferecem diversas vantagens comparativamente a outros materiais estruturais, nomeadamente elevada razão resistência/peso e elevada resistência à flexão. Como ambas as faces podem suportar cargas, as construções sandwich inerentemente fornecem múltiplas distribuições de carga que as tornam mais tolerantes ao dano em certas aplicações. A presença do núcleo, usualmente feito de espuma ou ninho de abelha de baixo peso, para além de resistir transversalmente ao corte e suportar a carga no plano, fornece outras funcionalidades como isolamento térmico e boa capacidade de absorção de energia para eventos de impacto. Consequentemente, a versatilidade da construção sandwich provém do tipo de material usado no núcleo [42]. Deste modo, o aumento das propriedades de resistência ao impacto e tolerância ao dano de estruturas sandwich pode ser conseguido introduzindo a cortiça como material do núcleo, factor em estudo nesta investigação.

Este capítulo é dedicado ao processo de manufactura dos provetes, incluindo a descrição dos materiais utilizados, das fases sequenciais de fabrico e do equipamento utilizado na sua construção. Outro ponto de interesse deste capítulo diz respeito à metodologia experimental usada no conjunto de ensaios mecânicos realizados no decorrer deste trabalho.

### **3.1 Descrição do processo de fabrico dos provetes sandwich**

Os provetes sandwich em estudo nesta investigação subdividem-se em dois tipos principais, ambos com faces de carbono/epoxy, diferindo entre si apenas no tipo de material do núcleo utilizado na sua construção, designadamente aglomerados de cortiça/epoxy e uma espuma rígida de polimetacrilimida, com nome comercial Rohacell®. O conjunto dos provetes sandwich com núcleo de cortiça integra duas espessuras nominais diferentes: 20 e 30 mm. Já os

provetes com núcleo de Rohacell® recorreram, apenas, a uma única espessura de 30 mm, condicionada pelo stock de material disponibilizado para o efeito. É de salientar que todas as etapas de fabrico dos provetes se processaram manualmente, o que permitiu um maior contacto com as técnicas utilizadas na produção de materiais compósitos.

### 3.1.1 Provetes sandwich com núcleo de cortiça

A preparação dos dois moldes que servem de base aos provetes sandwich, projectados e construídos especificamente para esta investigação, constituiu o início do processo. Os moldes, conforme ilustrado na Fig. 6, têm uma forma quadrangular com dimensões 250 x 250 x 80 mm. Depois de limpos, os moldes foram forrados com uma fina película de cera (desmoldante) para evitar possíveis problemas ao desenformar os provetes. A utilização de dois moldes idênticos visou reduzir o tempo de fabrico da totalidade dos provetes necessários para o presente trabalho.

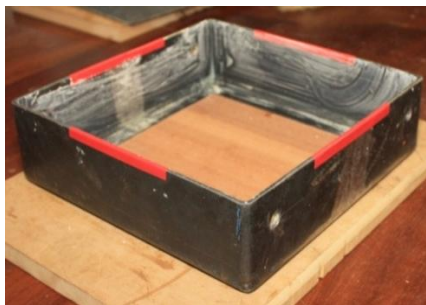


Fig. 6 – Molde usado no processo de fabrico dos provetes sandwich

De seguida, procedeu-se ao corte manual do tecido de fibra de carbono entrançado em direcções de 0° e 90° nas dimensões de 250 x 250 mm. A ficha técnica deste tecido encontra-se no Anexo 1. Após execução desta tarefa, realizou-se a laminagem manual das faces a partir do empilhamento de três camadas de tecido de carbono (reforço) para cada face, embebidas em resina epoxy (matriz). As características deste material, bem como do endurecedor, estão especificadas no Anexo 2. Utilizaram-se as mesmas proporções mássicas de tecido de carbono e resina epoxy em todos os provetes. Paralelamente, fez-se o preparado para o núcleo, misturando cortiça de granulometria 2/4, de qualidade “Bom”, com a resina epoxy anteriormente referida, com uma fracção percentual resina/cortiça de 20% (em termos de massa). As Figs. 7a e 7b ilustram o processo de laminagem manual das faces e a preparação do aglomerado de cortiça/epoxy, respectivamente.



Fig. 7 – Etapas de fabrico dos constituintes sandwich: (a) Laminagem manual das faces, (b) Preparação do aglomerado de cortiça/epoxy

Finda a preparação dos constituintes da sandwich, núcleo e faces, seguiu-se o empilhamento dos mesmos, como ilustrado pela Fig. 8. Primeiro, a face inferior da sandwich foi colocada no molde sobre uma base forrada com Teflon<sup>®</sup> (desmoldante), com vista a permitir não só uma fácil desmoldagem, mas também um acabamento mais cuidado. Seguidamente, introduziu-se no molde a mistura de granulado de cortiça com resina epoxy e, por último colocou-se a face superior juntamente com a tampa superior do molde igualmente forrada com Teflon<sup>®</sup>.

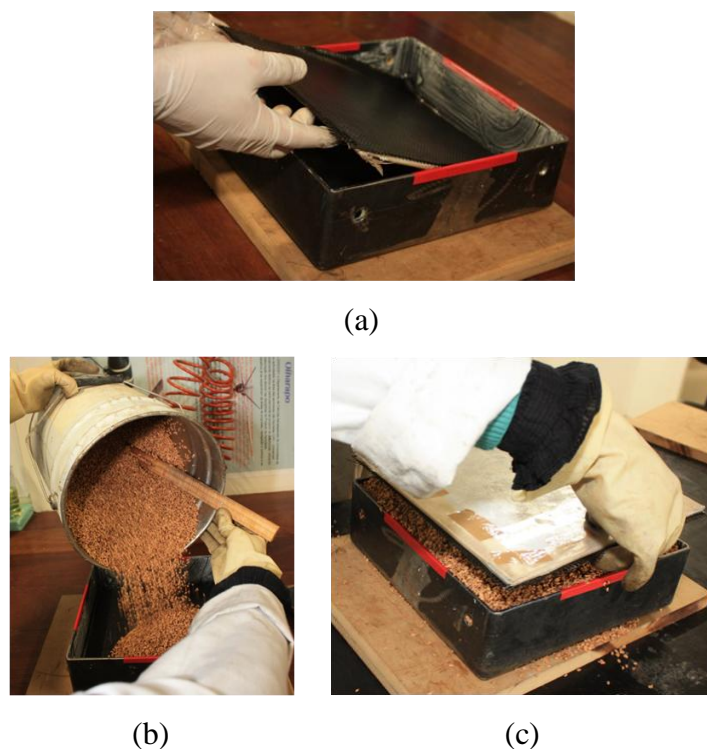


Fig. 8 - Etapas de empilhamento dos constituintes sandwich no molde: (a) Colocação da face inferior, (b) Introdução do aglomerado de cortiça, (c) Colocação da face superior

De modo a obter a espessura desejada do provete sandwich e promover uma colagem eficaz entre faces e núcleo, comprimiu-se o preparado final com recurso a uma prensa hidráulica até a tampa superior do molde coincidir com as marcações existentes no mesmo. A Fig. 9a ilustra o processo de compactação. No momento em que a tampa do molde atingiu as marcações, o manómetro da prensa hidráulica assinalava aproximadamente 50 bar. A cura do provete sandwich, ou seja, a sua fase de endurecimento foi realizada à temperatura ambiente durante cerca de 2 horas, permanecendo o molde na prensa durante este período. Findo o tempo de cura, o molde foi retirado da prensa e levado à estufa para realizar a pós-cura, durante cerca de 6 horas a 60°C (Fig. 9b).



(a)



(b)

Fig. 9 – Etapas finais do processo de construção dos provetes sandwich: (a) Compactação, (b) Cura na estufa

A Tabela 1 reúne os parâmetros usados no fabrico dos provetes sandwich carbono/cortiça, como descritos anteriormente.

Tabela 1 - Resumo dos parâmetros usados no fabrico dos provetes sandwich carbono/cortiça

<b>Provetes sandwich carbono/ cortiça</b>		
<b>Parâmetros de fabrico</b>	<b>Espessura 20 mm</b>	<b>Espessura 30 mm</b>
Quantidade de granulado de cortiça [g]	248	377
Quantidade de resina usada no núcleo [g]	62	94
Fracção percentual mássica resina/cortiça	20%	
Densidade do núcleo [kg/m <sup>3</sup> ]	260	
Quantidade de resina usada em cada face [g]	40,5	
Massa de fibra usada em cada face [g]	40,5	
Pressão de compactação [bar]	50	
Processo de cura	2 horas à temperatura ambiente + 6 horas a 60° C	

Finalmente, foi realizada a desmoldagem, os acabamentos e o controlo final dos provetes. A obtenção dos provetes sandwich com espessuras nominais de 20 e 30 mm derivou exactamente do mesmo processo de fabrico, diferindo apenas nas quantidades de granulado de cortiça e resina usadas no núcleo, de modo a se conseguir a mesma densidade de 260 Kg/m<sup>3</sup> para ambas as espessuras. Os provetes sandwich provenientes do processo de fabrico anteriormente descrito encontram-se representados na Fig. 10.

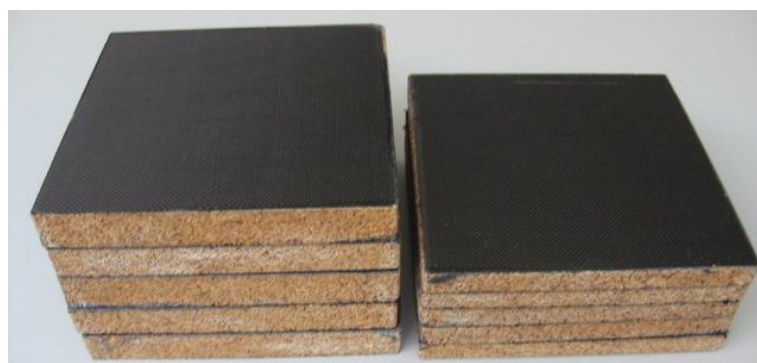


Fig. 10 – Provetes sandwich carbono/aglomerado de cortiça

### 3.1.2 Provetes sandwich com núcleo de Rohacell®

A manufactura dos provetes sandwich com núcleo de Rohacell® difere dos provetes carbono/cortiça essencialmente no modo de colagem entre as faces e o núcleo, uma vez que esta foi efectuada sem recurso a uma força de pressão, exercida pela prensa hidráulica no caso dos provetes carbono/cortiça. O processo de construção dos provetes com núcleo de Rohacell® compreendeu, portanto, um menor número de etapas, que serão descritas no parágrafo seguinte. As especificações da espuma Rohacell® constam no Anexo 3.

Após o corte manual do tecido de fibra de carbono entrançado *Ref. 195-1000* nas dimensões 250 x 250 mm, seguiu-se a laminagem das faces, em tudo idêntica à etapa descrita acima para o caso dos provetes com núcleo de cortiça. Concluída esta tarefa, as faces foram justapostas à placa de Rohacell® (30 mm de espessura), previamente cortada nas dimensões pretendidas, de modo a formar uma sandwich. O conjunto composto por faces e núcleo, foi então colocado entre duas placas de madeira forradas com Teflon® (desmoldante) e levado à estufa, onde permaneceu durante cerca de 6 horas a 60° C em processo de cura. Findo esse período, o provete foi retirado da estufa, precedendo-se ao seu acabamento e controlo final. A Fig. 11 ilustra os provetes sandwich carbono/Rohacell®.

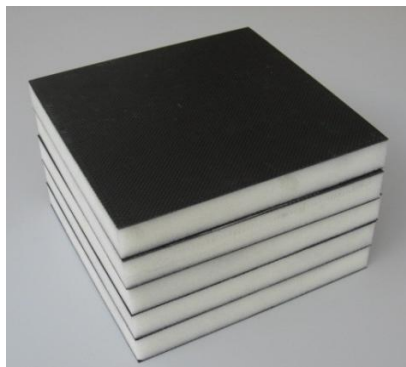


Fig. 11 – Provetes sandwich carbono/Rohacell®



### 3.2 Descrição de equipamento de ensaio

O equipamento que serviu de base a esta investigação pode dividir-se, de grosso modo, em dois grupos, consoante as funcionalidades que desempenham: intervenção directa na construção dos provetes e caracterização mecânica do material, por meio de ensaios de impacto e flexão a quatro pontos. O manuseio deste equipamento foi conduzido em instituições diferentes, nomeadamente, Instituto Politécnico de Tomar (IPT) e Universidade da Beira Interior (UBI), no contexto da colaboração entre ambas neste projecto.

De acordo com o descrito anteriormente, a compactação da cortiça até à espessura desejada foi feita com recurso a uma prensa hidráulica. Com vista a otimizar as propriedades da resina epoxy usada nos provetes sandwich, estes foram submetidos ao calor de uma estufa.

Os ensaios de impacto foram realizados numa máquina de impacto de queda livre de um peso IMATEK-IM10 (Fig. 12), vulgarmente conhecida por “drop-test machine”. A referida máquina, totalmente instrumentada com um sistema de aquisição de dados conectado a uma célula de carga piezoelétrica posicionada na raiz do impactor, é dotada de uma capacidade de recolha de 32000 pontos. Da sua constituição fazem parte uma torre com duas colunas-guia, um carrinho que suporta o impactor e que desliza nas colunas-guia através de rolamentos, e uma câmara onde se fixa a amostra num dispositivo adequado e onde é possível controlar a temperatura. Está ainda equipada com um dispositivo de prevenção de segundo impacto e um software ImpAqt Versão 1.3, que permite obter curvas de aceleração, velocidade, deslocamento, energia e outros parâmetros definidos pelo utilizador.

O impactor pode ser elevado até uma altura predeterminada e solto na direcção vertical com reduzido atrito nas colunas-guia. Ao peso em queda podem associar-se vários tipos de impactores, com diferentes geometrias. A massa total do conjunto pode ainda ser alterada pela adição de massas.

A energia de impacto está associada à força gravítica e é controlada pelo ajustamento da altura de queda que varia entre 0,050 m e 3 m, possuindo um sistema de massas variável até 30 Kg.



Fig. 12 – Máquina de ensaios de impacto IMATEK-IM10

Os ensaios de flexão em 4 pontos foram realizados numa máquina de ensaios universal Instron, modelo 1341, visível na Fig. 13. Trata-se de uma máquina servo-hidráulica, dotada de uma célula de carga de 100 KN. A velocidade de deslocamento do actuador foi, para todos os ensaios realizados, de 6 mm/minuto, de modo a provocar a falha entre os 3 e os 6 minutos, de acordo com o recomendado pela norma inerente a estes ensaios, tal como se verá adiante.



Fig. 13 – Máquina de ensaios universal Instron, modelo 1341

### 3.3 Metodologia experimental

#### 3.3.1 Considerações relativas à geometria dos provetes

Os ensaios realizados no decurso desta investigação visam, não só compreender o comportamento das estruturas sandwich ao impacto, como também pretendem caracterizar a sua resistência residual. Para o efeito, recorreu-se a ensaios de flexão em 4 pontos para avaliar as propriedades residuais do material com dano resultante do impacto. Existe, portanto, um encadeamento dos ensaios, sendo o mesmo conjunto de provetes sujeito aos dois tipos de caracterização mecânica: impacto e flexão. Uma vez que a geometria dos provetes para os ensaios de impacto está condicionada pelas características dos ensaios de resistência pós-impacto, tornou-se importante repensar este aspecto. Atendendo, particularmente, aos requisitos da norma ASTM C393/C393M [43] para os ensaios de flexão, e na ausência de qualquer tipo de norma específica para ensaios de impacto em estruturas sandwich, conclui-se que os provetes deveriam apresentar uma secção rectangular com as seguintes dimensões: 190 x 70 mm. A esquematização das dimensões dos provetes a ensaiar encontra-se no Anexo 4.

Os painéis sandwich construídos anteriormente foram, então, cortados numa máquina de corte *Struers Accutom-2* com uma serra de disco diamantado de 1 mm de espessura. Cada painel (lote) originou três provetes, obtendo-se na totalidade 45 provetes de ensaio.

A Tabela 2 identifica o tipo e a geometria do material usado no núcleo das estruturas sandwich divididos por lotes e ensaios. Cada tipo de estruturas sandwich estudadas (Carbono/Cortiça-20mm, Carbono/Cortiça-30mm e Carbono/Rohacell®) integram 5 lotes, sendo possível realizar três ensaios por cada lote. Para posterior referência a cada um destes ensaios de um determinado lote e material, foi estabelecido o seguinte código de nomenclatura:

Tabela 2 – Código de nomenclatura dos provetes sandwich

Dígito	Significado
1º	Tipo de Material do Núcleo:  C – Cortiça  R - Rohacell®
2º	Espessura da Sandwich:  2 – 20 mm  3 – 30 mm
3º	Lote
4º	Ensaio

**Nota:** O código deve ser lido da direita para a esquerda. Por exemplo, o código C3-31 refere-se ao 1º ensaio do lote 3 da sandwich de 30 mm com núcleo de cortiça.

### 3.3.2 Ensaio de impacto de baixa velocidade

Apesar de o impacto ser um dos carregamentos mais críticos em estruturas sandwich, não existe uma norma específica que se centre nesta matéria. No entanto, existem métodos de teste de impacto standardizados desenvolvidos para materiais poliméricos que poderão, à partida, ser também aplicados a painéis sandwich mediante ligeiras alterações que proporcionem a sua aplicabilidade. Dentro de estes métodos, destacam-se a norma ISO 6603 [44], ASTM D6264/D6264M [45] e a ASTM D7136/D7136M [46]. Um ponto comum a estas normas é que todas utilizam uma instalação de queda de massa. Na corrente investigação, a norma que serviu de apoio para a realização dos testes de impacto foi a ASTM D7136/D7136M [46].

Os ensaios de impacto foram realizados na máquina IMATEK-IM10 cujas características já foram referidas na secção 3.2 deste capítulo. Os provetes foram encastrados nas 4 extremidades da janela de impacto, representada esquematicamente na Fig. 14. A zona de impacto foi

escolhida criteriosamente em função da área de tensões de corte a que o provete está sujeito durante os testes de flexão. No decorrer dos ensaios foi utilizado um impactor de cabeça hemisférica de 20 mm de diâmetro. O conjunto impactor, cuja massa de 3 kg é comum a todos os ensaios, foi deixado cair verticalmente de quatro alturas diferentes: 0,17 m, 0,34 m, 0,51 m e 0,68 m, de modo a obter níveis de energia de 5 J, 10 J, 15 J e 20 J, respectivamente.

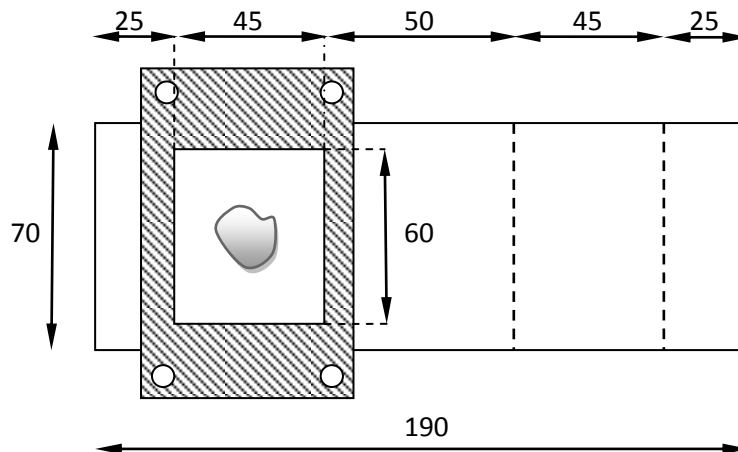


Fig. 14 – Esquema representativo da janela de impacto e das dimensões gerais do provete

### 3.3.3 Ensaio de flexão em quatro pontos

De entre os métodos de teste referidos na secção 2.4 da Revisão Bibliográfica, os ensaios de flexão foram os escolhidos para avaliar a resistência residual no âmbito deste trabalho. Esta escolha deveu-se ao facto destes ensaios permitirem caracterizar vários tipos de esforços: esforços de corte por parte do núcleo, compressão e tracção na face com dano de impacto e na face sem dano, respectivamente. Um outro motivo para a preferência deste tipo de ensaios prende-se com a simplicidade da instalação experimental exigida pelos mesmos, quando comparada com outros tipos de testes.

Como já referido, a norma usada para este tipo de ensaios foi a ASTM C 393/C 393M - “Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure” [43]. Este método de teste abrange a determinação das propriedades de corte do núcleo de construções sandwich planas sujeitas à flexão, de tal modo que os momentos aplicados produzem curvatura dos planos das faces da sandwich. As propriedades de corte possíveis de

calcular com esta norma incluem a resistência ao corte do núcleo, bem como a resistência ao corte da ligação face-núcleo e a rigidez da viga sandwich.

Segundo esta norma, e relativamente à geometria dos provetes devem ser respeitados os seguintes parâmetros:

- i) Os provetes devem ter secção rectangular;
- ii) A largura não deve ser menor do que o dobro da espessura total nem maior do que seis vezes a referida espessura. ( $2d \leq b \leq 6d$ );
- iii) A largura deve ser maior ou igual ao triplo da espessura do núcleo ( $b \geq 3c$ );
- iv) A largura deve ser menor ou igual a  $\frac{1}{2}$  do vão entre os apoios ( $b \leq \frac{1}{2} S$ );
- v) O comprimento deve ser igual ao vão entre os apoios mais 50 mm ou mais metade da sua espessura, escolhendo-se sempre a maior destas duas medidas.

A Fig. 15 ilustra a nomenclatura das dimensões de espessura da sandwich, para uma melhor compreensão dos parâmetros anteriormente referidos.

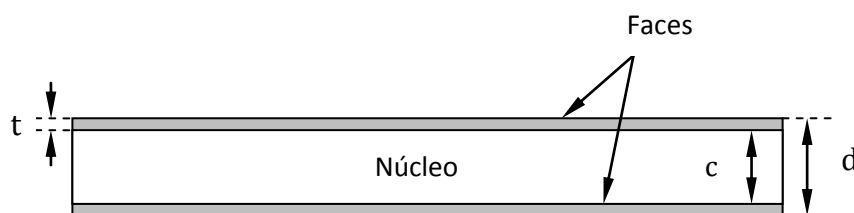


Fig. 15 – Nomenclatura das dimensões de espessura da sandwich

Outro aspecto a ter em conta é que as barras de contacto com o provete devem ter rigidez suficiente para evitar deflexão significativa das mesmas aquando do carregamento. Devem possuir ainda uma geometria e dimensão adequadas de modo a não provocarem elevadas concentrações de tensão nas regiões de contacto, o que se podia reflectir no modo de falha do material.

Os ensaios à flexão podem ser efectuados a 3 pontos, a 4 pontos com os travessões móveis a uma distância dos suportes igual a  $\frac{1}{4}$  do vão e a 4 pontos com os travessões móveis a uma distância dos suportes igual a  $\frac{1}{3}$  do vão. A norma adverte para o facto de cargas concentradas em provetes com faces finas e núcleos de pequena densidade poderem conduzir a resultados de difícil interpretação, especialmente na zona próxima do ponto de rotura. Para evitar situações

semelhantes, optou-se por ensaios de flexão a 4 pontos com os travessões móveis a uma distância dos suportes igual a  $1/3$  do vão (ver Fig. 16). Outra solução, recomendada pela norma, para evitar o esmagamento das faces, é o uso de peças de borracha entre os pontos de carregamento e o provete.

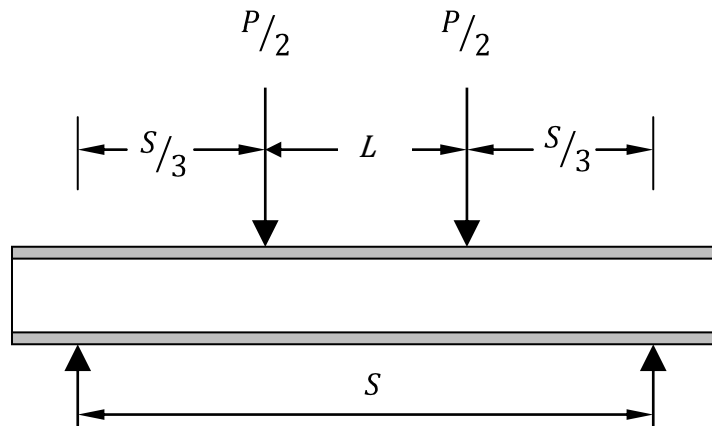
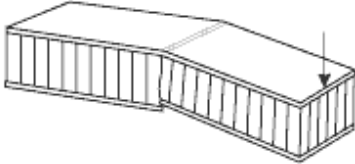
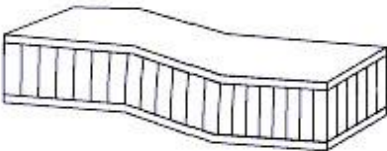
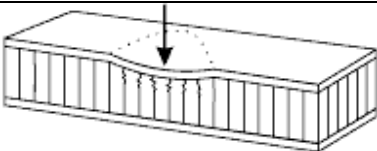

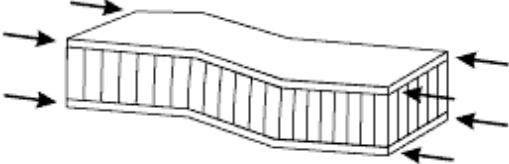

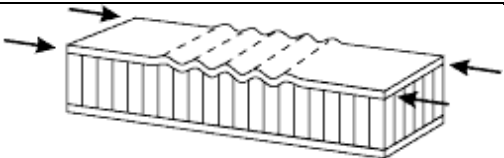


Fig. 16 - Esquema do ensaio de flexão a quatro pontos, com os travessões móveis a uma distância dos suportes igual a  $1/3$  do vão

Para determinar a tensão de corte no núcleo, deve-se garantir que os mecanismos de falha do provete ocorrem exclusivamente por corte. Para tal é necessário construir o provete de modo a que os momentos produzidos na rotura do núcleo não excedam as tensões limite de compressão e de tracção do material das faces. Isto exige faces mais espessas e/ou um menor vão entre os suportes. No entanto, se as faces forem demasiado espessas, estas suportarão a maior parte das tensões de corte, o que se pode reflectir numa tensão de corte máxima do núcleo maior do que a obtida pelos métodos usuais. Além dos mecanismos de falha por corte é preciso ter em atenção que existem outros tipos. A Tabela 3 reúne todos os mecanismos de falha possíveis de ocorrer em estruturas sandwich [47].

Tabela 3 – Mecanismos de falha de estruturas sandwich

Mecanismos de falha	Esquematisação
<i>Falha nas faces</i>	
<i>Falha por corte</i>	
<i>Esmagamento local do núcleo</i>	
<i>Enrugamento localizado</i>	
<i>Instabilidade geral</i>	
<i>Instabilidade das faces</i>	
<i>Instabilidade localizada</i>	

Após alguns ensaios preliminares com o intuito de averiguar o cumprimento das condições impostas pela norma e se os mecanismos de falha eram os pretendidos (corte no núcleo), observou-se que, mesmo dividindo a carga em dois pontos de carregamento e utilizando peças



em borracha, ocorria esmagamento das faces. Este facto é explicado pela reduzida espessura das mesmas em relação ao núcleo, não conseguindo, deste modo, suportar as tensões de corte produzidas pelo núcleo.

A fim de contornar este problema, optou-se por distribuir a carga uniformemente entre os dois pontos de carregamento, utilizando-se para o efeito uma placa de aço com uma ranhura de encaixe com o actuador da máquina e rigidez suficiente para não flectir, evitando assim alterações nos resultados. Ainda para acautelar o esmagamento das faces, as arestas inferiores da placa foram limadas e procedeu-se ao uso de borrachas entre o provete e a placa, como ilustrado pela Fig. 17.



Fig. 17 – Acessórios usados nos ensaios de flexão

Na Tabela 4, constam as principais dimensões inerentes aos ensaios de flexão. Deve notar-se que, existem pequenos incumprimentos da norma, nomeadamente a condição iii) anteriormente referida para o caso dos provetes com espessura nominal de 30mm e o comprimento do vão dos pontos de carga não ser exactamente  $S/3$ . Isto deveu-se ao facto da necessidade de usar um vão entre os suportes bastante pequeno de modo a promover a falha no núcleo devido a esforços de corte, o que levou a um ajustamento das restantes dimensões em função da norma.

Tabela 4 – Principais dimensões dos provetes inerentes aos ensaios de flexão

Material do núcleo	c médio [mm]	d médio [mm]	b [mm]	L [mm]	S [mm]
Aglomerado de cortiça	18	20	70	50	140
	28	30			
Rohacell®	28	30			

### 3.3.4 Método de observação e quantificação do dano

Como já foi referido na secção 2.3.1 da Revisão Bibliográfica, existem diversas técnicas para determinar a extensão do dano de impacto em materiais compósitos. Inicialmente, pensou-se em efectuar a avaliação do dano nos provetes por meio de uma inspecção ultra sónica com varrimento, conhecida por C-Scan. Neste ensaio uma sonda emite impulsos a uma determinada frequência em direcção ao provete e um receptor recebe os sinais reflectidos por eventuais descontinuidades aí presentes. Estes sinais são, então, transformados em sinais eléctricos que são amplificados, permitindo a obtenção de uma imagem numa escala de cores ou de tons de cinza, sendo a diferenciação de cores a indicação da existência de um defeito na peça. Após a realização de vários ensaios utilizando esta técnica com recurso a um aparelho *Ultrapac II* e uma sonda de 5 MHz, concluiu-se que havia muita interferência na recepção dos sinais reflectidos pelo provete, não se obtendo, deste modo, uma imagem perceptível da zona do dano. Este facto resulta da elevada heterogeneidade dos materiais em estudo, a qual provoca uma reflexão exagerada de ondas que não conseguem ser devidamente interpretadas pelo receptor.

Uma vez que a técnica anteriormente referida não se revelou eficaz, optou-se por caracterizar o dano por meio de acompanhamento visual por fotografia. Este processo envolveu duas fases distintas:

- 1) Registo fotográfico do dano nas faces das estruturas sandwich, após os ensaios de impacto.
- 2) Seccionamento dos provetes e registo, por meio de fotografia, do aspecto visual interno do dano, após os ensaios de impacto e flexão.

Estes registos foram feitos com o objectivo de oferecer uma ideia de como se processa o desenvolvimento externo e interno dos danos ao longo dos eventos de impacto. As imagens foram capatadas com uma máquina CANON digital modelo EOS-1 Mark II equipada com uma lente EF100 mm, f/2.8 Macro USM de grande resolução. Durante a sessão fotográfica, a máquina encontrava-se apoiada num suporte próprio contendo dois focos de luz adequados, de modo a obter fotografias de elevada qualidade. Como se pretendia apenas comparar o tipo de dano resultante dos diferentes níveis de energia de impacto nos três conjuntos sandwich em estudo, não houve necessidade de fotografar todas as amostras, escolhendo-se apenas uma amostra representativa de cada lote. Deve notar-se, ainda, que a 1ª fase de caracterização do dano tem um carácter não destrutivo, enquanto que a 2ª fase conduziu à destruição da amostra através do seccionamento dos provetes. O seccionamento foi feito com recurso à máquina XXXX e consistiu no corte transversal do provete na zona central do dano e posterior polimento da amostra.

De modo a avaliar a extensão do dano, recorreu-se ao software LEICA MW existente no Centro de Óptica da UBI. Este software permitiu calcular a área e a profundidade do dano de cada provete submetido a observação. Após importação das imagens para o referido programa, foi realizada a calibração do mesmo que consistiu numa correspondência entre uma escala em *mm* e um determinado número de píxeis da fotografia. De seguida, procedeu-se à traçagem manual do contorno do dano, como exemplificado na Fig. 18. Por ultimo, o programa forneceu o valor da área e das restantes dimensões correspondentes à zona de dano.

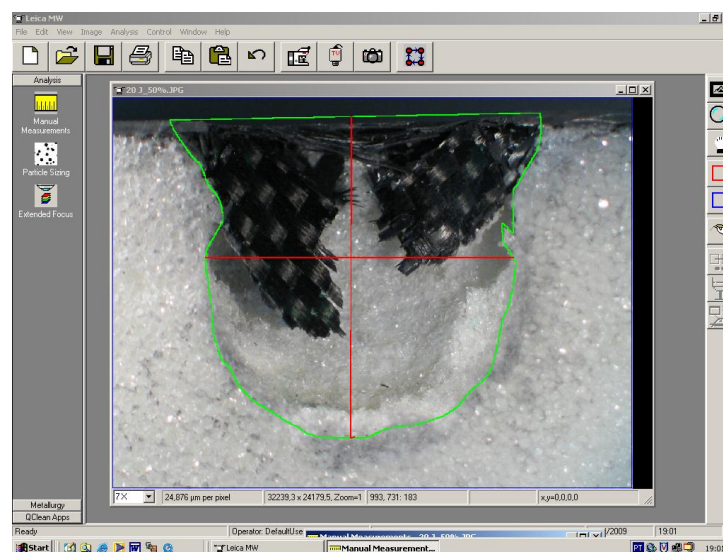


Fig. 18 – Avaliação da extensão do dano com o auxílio do software LEICA MW

## Capítulo 4

# Análise experimental: resultados e discussão

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir dos ensaios de impacto e flexão, bem como os resultados e as imagens relativas à quantificação da extensão de dano nos provetes, por meio da técnica de observação visual.

### 4.1 Ensaaios de resistência ao impacto

O cerne desta investigação consistiu na avaliação do desempenho de estruturas sandwich sujeitas a cargas dinâmicas de impacto. Recorrendo a distintos níveis de energia de impacto (5J, 10J, 15J e 20J), procedeu-se a um estudo comparativo das forças envolvidas e da duração de contacto impactor/provete, do deslocamento do impactor e da energia absorvida pelo provete durante o impacto. Dado o elevado número de resultados, em forma de gráficos, gerado pela combinação destes parâmetros, apenas serão ilustrados aqueles que possuem características que merecem ser alvo de uma maior apreciação. Os restantes encontram-se no Anexo 5. Importa também referir que, em virtude dos resultados de impacto para as estruturas sandwich carbono/cortiça com as espessuras nominais de 20 e 30 mm serem idênticos, apenas serão apresentados os gráficos referentes a estes últimos. A Fig. 19 exemplifica a semelhança entre os dois tipos de estruturas sandwich referidos, através de um gráfico força-tempo para o nível de energia de 5J., sendo visível a semelhança entre os valores de força obtidos para ambos os casos, assim como o período de duração do evento de impacto.

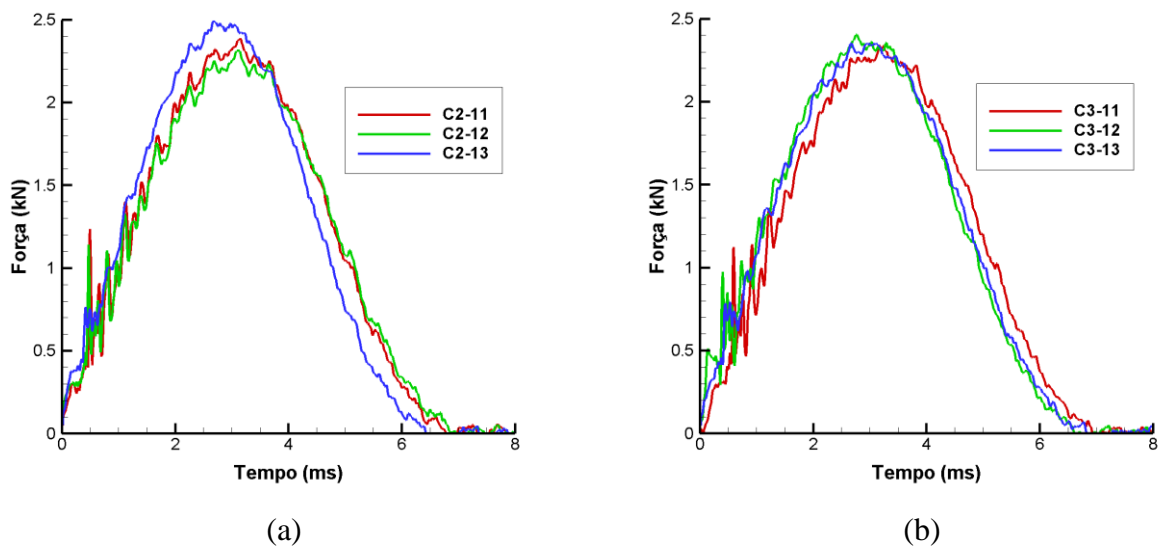


Fig. 19 – Curvas de força-tempo a 5 J de energia de impacto: (a) Sandwich carbono/cortiça-20 mm, (b) Sandwich carbono/cortiça-30mm

Os lotes 1, 2, 3 e 4 de cada um dos tipos de sandwich foram sujeitos a energias de impacto de 5 J, 10 J, 15 J e 20 J, respectivamente. O lote 5 não foi sujeito a impacto de modo a servir de referência como material não danificado para efeitos de comparação nos ensaios de flexão que foram realizados posteriormente.

Para facilitar a análise de resultados, e uma vez que o objectivo é observar o comportamento ao impacto, de cada material, para os diversos níveis de energia, os gráficos encontram-se dispostos do nível de energia mais baixo (5 J) para o mais elevado (20 J). Deve notar-se que estes gráficos, fornecidos pelo “software” da máquina de impacto, são obtidos por integrações numéricas realizadas pelo próprio “software”, com base nas seguintes equações, como recomendado pela norma ASTM D7136/D7136M [46]:

$$F(t) = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (1)$$

onde,  $F(t)$  é a força lida pela célula de carga da máquina de impacto

$m$  é a massa do impactor

$d^2x/dt^2$  é a aceleração

A partir da equação (1), calcula-se a velocidade através da equação (2):

$$v(t) = v_i + gt - \int_0^t \frac{F(t)}{m} dt \quad (2)$$

onde,  $v(t)$  é a velocidade do impactor em função do tempo

$v_i$  é a velocidade de impacto

$g$  é a aceleração devido à gravidade,  $9,81 \text{ m/s}^2$

O deslocamento do impactor em função do tempo é dado pela equação (3):

$$\delta(t) = \delta_i + v_i t + \frac{gt^2}{2} - \int_0^t \left( \int_0^t \frac{F(t)}{m} dt \right) dt \quad (3)$$

onde,  $\delta(t)$  é o deslocamento do impactor em função do tempo

$\delta_i$  é o deslocamento do impactor desde a posição de referencia quando  $t=0$

A equação (4) é calculada a partir das equações (2) e (3):

$$E_a(t) = \frac{m v_i^2 - v(t)^2}{2} + mg\delta(t) \quad (4)$$

Onde,  $E_a(t)$  é a energia absorvida em função do tempo.

#### 4.1.1 Nível de Energia – 5J

As Figs. 20a e 20b mostram as curvas de força-tempo para a sandwich de carbono/cortiça e carbono/Rohacell® a um nível de energia de 5 J, respectivamente. No que diz respeito à sandwich com núcleo de cortiça, pode-se verificar que a força de impacto cresce progressivamente até o deslocamento máximo ser atingido (aos 3,5 ms), decrescendo em seguida gradualmente até o impactor se separar da sandwich, anulando-se neste momento a força (aos 7ms). No caso da sandwich com núcleo de Rohacell®, observa-se uma queda acentuada da força com grandes oscilações após ter atingido um pico de força de cerca de 2,35 kN, o que se poderá

explicar por uma provável ocorrência de falha na face da sandwich e, possivelmente, até no núcleo.

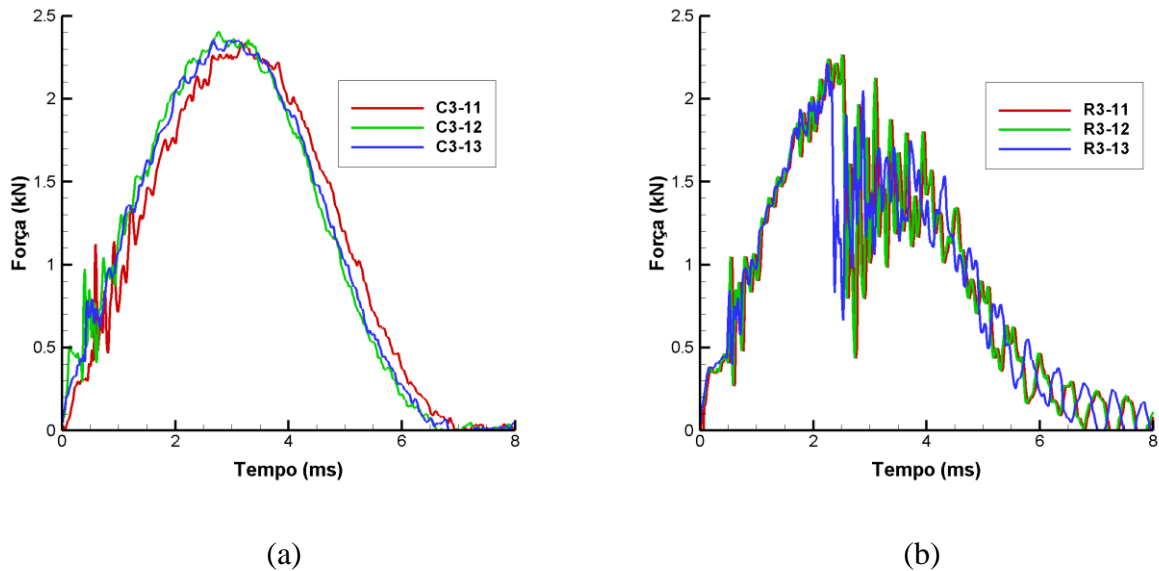


Fig. 20 – Curvas de força-tempo a 5 J de energia de impacto: (a) Sandwich carbono/cortiça-30 mm, (b) Sandwich carbono/Rohacell®

Os gráficos representados nas Figs. 21a e 21b evidenciam a variação da força que o impactor exerce sobre a estrutura em função do seu deslocamento. Para ambos os casos da Fig. 21, as curvas fecham-se no ponto onde a força volta a anular-se, tendo assim um aspecto tipo *loop*. A área incluída no interior do *loop* formado por cada curva representa a energia absorvida durante o impacto. Observa-se facilmente que a área correspondente ao gráfico da Fig. 21b é maior do que o da Fig. 21a, pelo que a energia absorvida pela cortiça é menor do que no caso do Rohacell®, mostrando uma maior capacidade de dissipar energia.

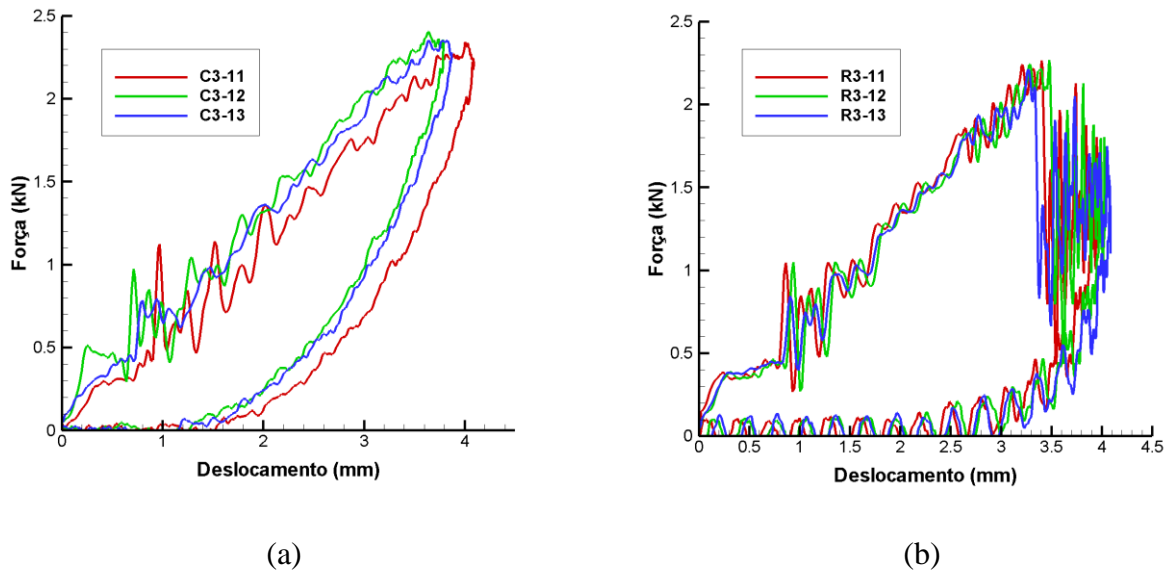


Fig. 21 - Curvas de força-deslocamento a 5 J de energia de impacto: (a) Sandwich carbono/cortiça-30 mm, (b) Sandwich carbono/Rohacell®

Num impacto, parte da energia é absorvida pela amostra e resulta em deformação permanente e dano, enquanto a restante é convertida em energia de deformação elástica e vibração e, depois, dissipada sob a forma de calor. A energia dissipada inclui, por sua vez, todas as fontes dissipativas que irreversivelmente transformam as energias cinética e potencial em energia irrecuperável. Podem distinguir-se as energias dissipadas, externamente por acção do atrito e, internamente, devido à ocorrência dos mecanismos de dano do material. A energia de impacto pode, assim, dividir-se em energia absorvida e energia dissipada. Os gráficos da Fig.22 são obtidos por integração simples dos diagramas força-deslocamento já ilustrados anteriormente. O ponto máximo em cada curva equivale à energia de impacto. Como se vê, verifica-se um decréscimo mais acentuado da energia para o caso da sandwich com núcleo de cortiça do que para o caso da sandwich com núcleo de Rohacell®, o que significa que para este último caso a energia dissipada internamente é maior, o que se traduz num aumento do dano do material.



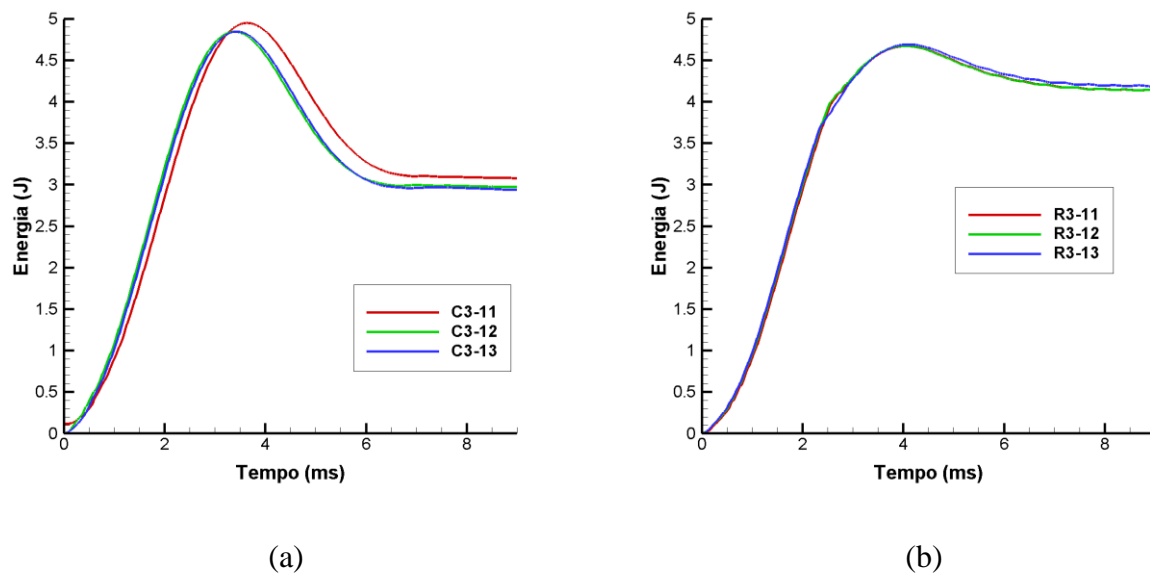


Fig. 22 - Curvas de energia- tempo a 5 J de energia de impacto: (a) Sandwich carbono/cortiça-30 mm, (b) Sandwich carbono/Rohacell®

#### 4.1.2 Nível de Energia – 10 J

Da análise dos gráficos da Fig. 23, que representam a força em função do deslocamento para os dois tipos de material, verifica-se que a força atinge um valor máximo mais elevado para a sandwich de cortiça do que para a sandwich de Rohacell® a um mesmo nível de energia (respectivamente, 2,91 kN e 2,21 kN), o que faz pressupor que a cortiça dispõe de uma superior resistência ao impacto.

Por outro lado, estes gráficos permitem detectar uma clara diferença na resposta de ambos os tipos de material face ao evento de impacto. Em termos qualitativos, a curva de resposta da sandwich de cortiça apresenta um aspecto menos oscilatório do que aquele evidenciado pelo Rohacell®. Esta é uma característica que demonstra a excelente capacidade de amortecimento vibrático intrínseco às propriedades naturais da cortiça.

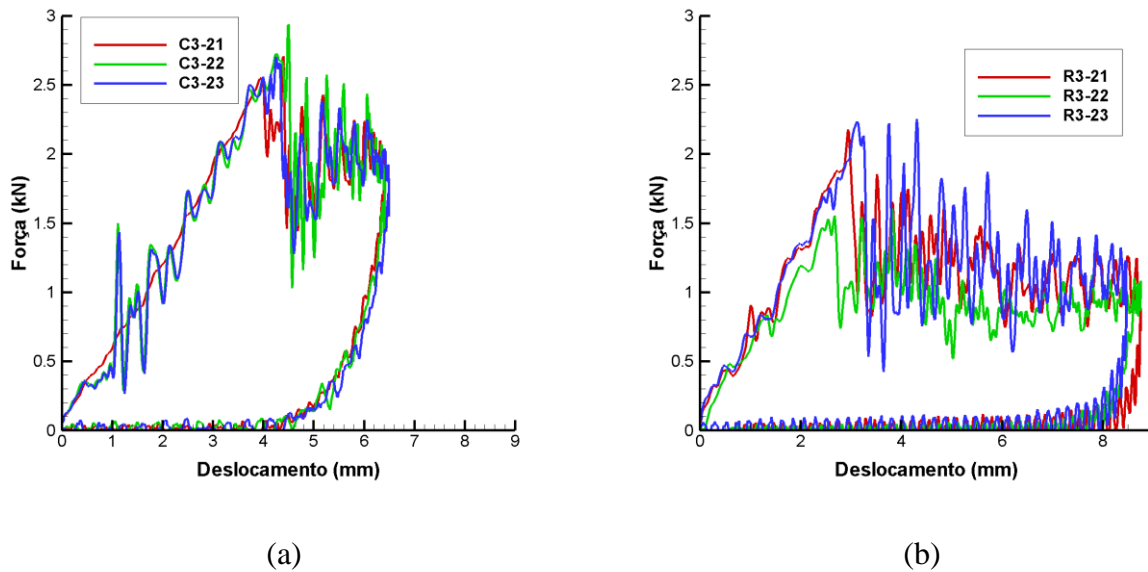


Fig. 23 - Curvas de força-deslocamento a 10 J de energia de impacto: (a) Sandwich carbono/cortiça-30 mm, (b) Sandwich carbono/Rohacell®

#### 4.1.3 Nível de Energia – 15J

Da análise da Fig. 24, onde se expressa a força em função do tempo, constata-se que o tempo de duração do impacto é ligeiramente superior para o caso da sandwich com núcleo de Rohacell®. No caso da Fig. 24a, o tempo em que terminou o contacto, isto é, quando a força exercida entre a estrutura e a extremidade do impactor se anulou situa-se em aproximadamente 8 ms. Já no gráfico da Fig. 24b, o tempo é de aproximadamente 10 ms para os ensaios 2 e 3. Isto indica que a estrutura sandwich à base de cortiça possui uma maior propensão ao ressalto, isto é, apresenta um comportamento mais elástico e, por isso, previne a probabilidade de ocorrência de dano com maior extensão. Ainda na Fig. 24b, o ensaio 1 apresenta grandes oscilações de força, o que poderá ser devido a uma irregularidade no processo de fabrico do provete em causa.

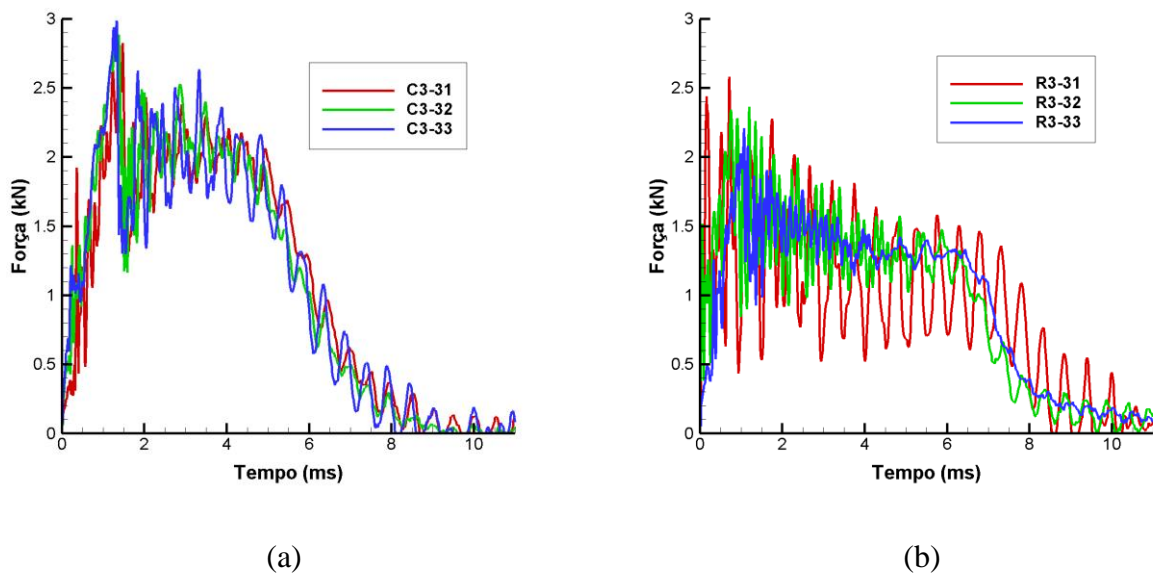


Fig. 24 - Curvas de força-tempo a 15 J de energia de impacto: (a) Sandwich carbono/cortiça-30 mm, (b) Sandwich carbono/Rohacell®

#### 4.1.4 Nível de Energia – 20 J

A Fig. 25 mostra as curvas de força-deslocamento correspondentes ao impacto de energia de 20 J nos dois tipos de material considerados. No caso das curvas relativas ao Rohacell® é possível identificar a transição do caso em que o impactor ressalta para aquele em que pára, perfurando parcialmente a estrutura sandwich: as curvas representativas dos ressaltos dobram-se sobre elas próprias em direcção ao decréscimo de deslocamento (tal como evidenciado no caso da cortiça (Fig. 25a), tendo assim um aspecto de *loop*, enquanto que nos casos de perfuração parcial em que o impactor pára, atinge-se o deslocamento máximo. Outro aspecto a realçar é que no caso da sandwich carbono/Rohacell® o único ressalto deverá ter sido provocado pelo excesso de resina na face superior motivado pela laminagem manual da mesma, que lhe conferiu uma maior resistência.

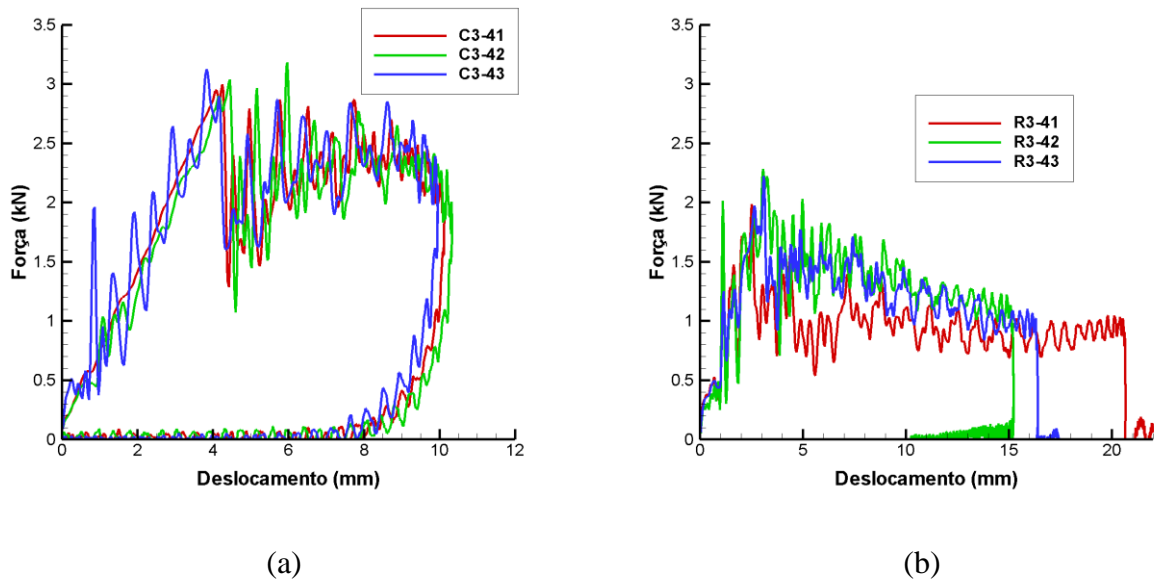


Fig. 25 - Curvas de força-deslocamento a 20 J de energia de impacto: (a) Sandwich carbono/cortiça-30 mm, (b) Sandwich carbono/Rohacell®

Na Fig. 26 realça-se que para um nível de energia de 20 J, a sandwich com núcleo de Rohacell® absorve toda a energia durante o impacto. Neste sentido, diz-se que o material está “saturado”. Por sua vez, a sandwich à base de cortiça liberta a parte residual da energia elástica armazenada durante o contacto com o impactor. No instante final, o valor indicado no gráfico corresponde à energia armazenada pelo material, ou seja, aquela que está na origem dos processos de dano decorrentes do impacto.

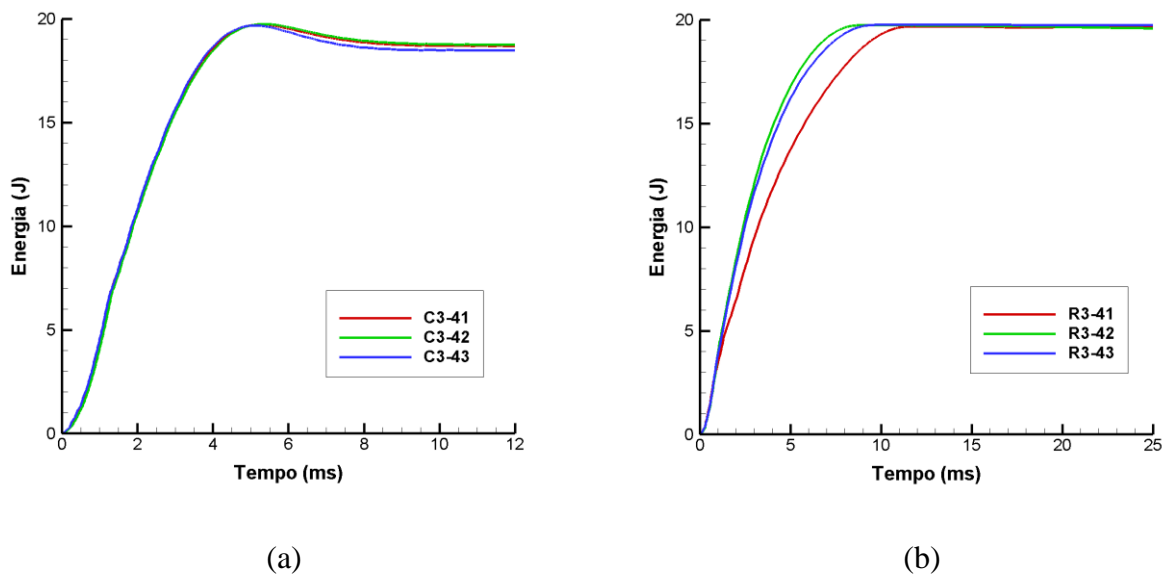


Fig. 26 - Curvas de energia-tempo a 20 J de energia de impacto: (a) Sandwich carbono/cortiça-30 mm, (b) Sandwich carbono/Rohacell®

Os factos verificados na análise dos gráficos anteriores são reforçados pela Fig. 27. É importante referir que, mesmo não estando aqui representadas, todas as curvas deslocamento vs tempo dos provetes com núcleo de cortiça comportam o mesmo padrão representado na Fig. 27a, onde inicialmente o deslocamento é positivo, denotando o movimento do impactor no sentido descendente e, imediatamente após o impacto, o impactor inicia o movimento ascendente, de ressalto, traduzido em termos gráficos pelo deslocamento negativo. Se após a queda não se verificar o ressalto, é porque a estrutura não possui qualquer energia interna residual para trocar com o impactor, conforme se reconhece na Fig. 27b para o caso dos ensaios 1 e 3, onde o deslocamento é sempre positivo.

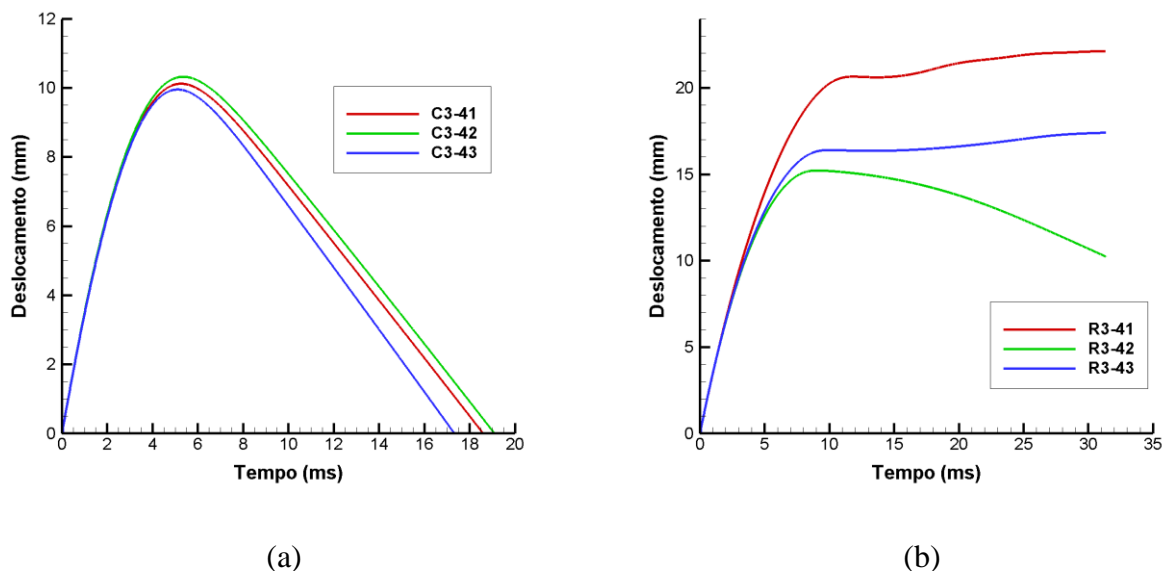


Fig. 27 – Curvas de deslocamento-tempo a 20 J de energia de impacto: (a) Sandwich carbono/cortiça-30 mm, (b) Sandwich carbono/Rohacell®

#### 4.1.5 Historial de forças e balanço energético

O gráfico da Fig. 28 reúne os valores médios do pico de força máxima atingido por cada provete. O objectivo é comparar, de uma forma explícita, a força que cada tipo de material conseguiu suportar em cada nível de energia. É notório um aumento da força em função da energia de impacto para ambas as estruturas sandwich à base de cortiça, enquanto as sandwich carbono/Rohacell® apresentam uma força quase constante para as três primeiras energias de impacto, verificando-se um decréscimo para o último.

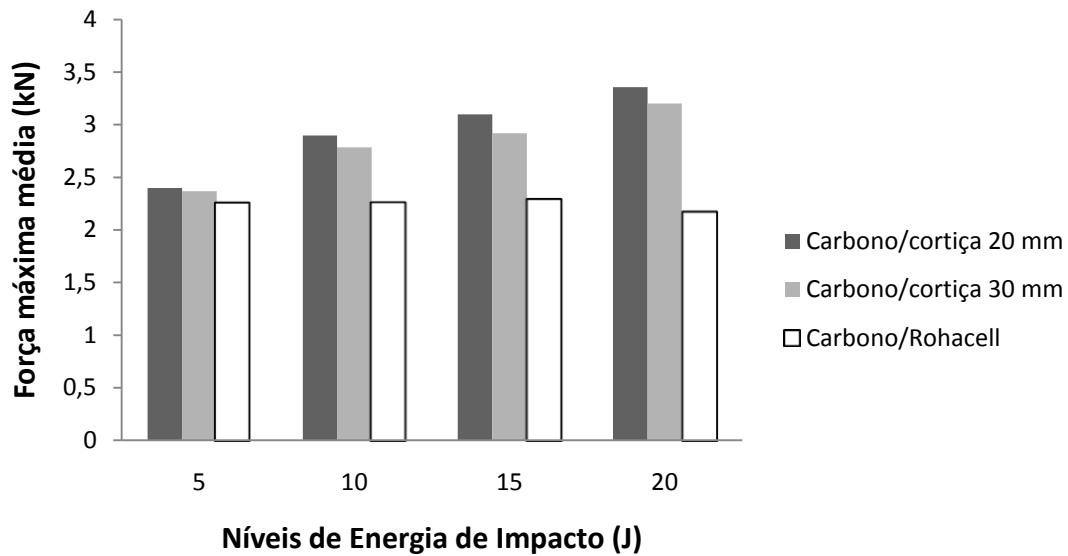


Fig. 28 – Historial da força para cada tipo de material, em função do nível de energia de impacto

Com base nos gráficos de barras representados nas Figs. 29, 30 e 31, é possível uma maior percepção das parcelas da energia envolvidas nos ensaios realizados aos três tipos de material seleccionados. Em ambos os gráficos, é evidente o crescimento da energia absorvida pelo material à medida que a altura de queda aumenta, como resultado da degradação do material, contrariamente ao que acontece com a energia dissipada, responsável pelo ressalto do impactor. No caso das sandwich carbono/Rohacell<sup>®</sup>, a energia dissipada diminui até se anular, não sobrando energia para se dar o ressalto. Comparativamente a este tipo de material, as sandwich à base de cortiça mostram boa resistência ao impacto visto que a energia libertada é sempre suficiente para se dar o ressalto do impactor, provocando um dano mais reduzido.

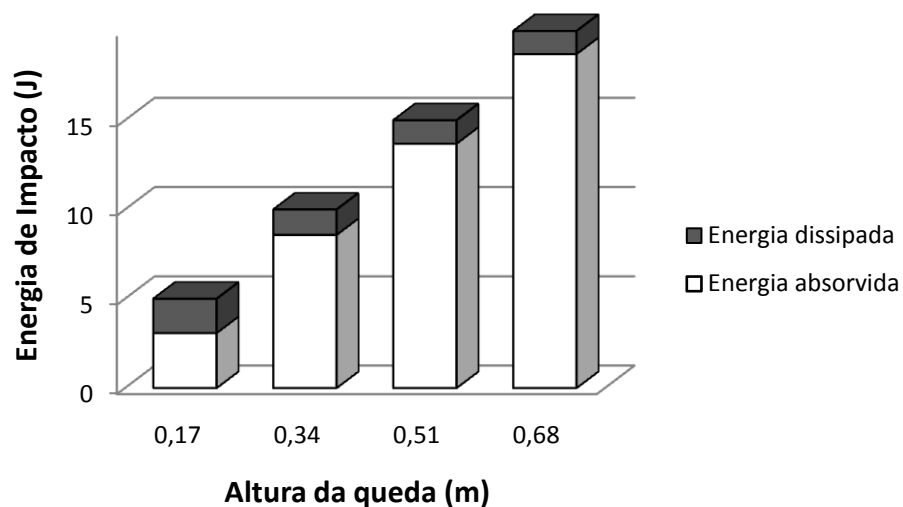


Fig. 29 – Balanço da energia nas estruturas sandwich carbono/cortiça de 20 mm de espessura

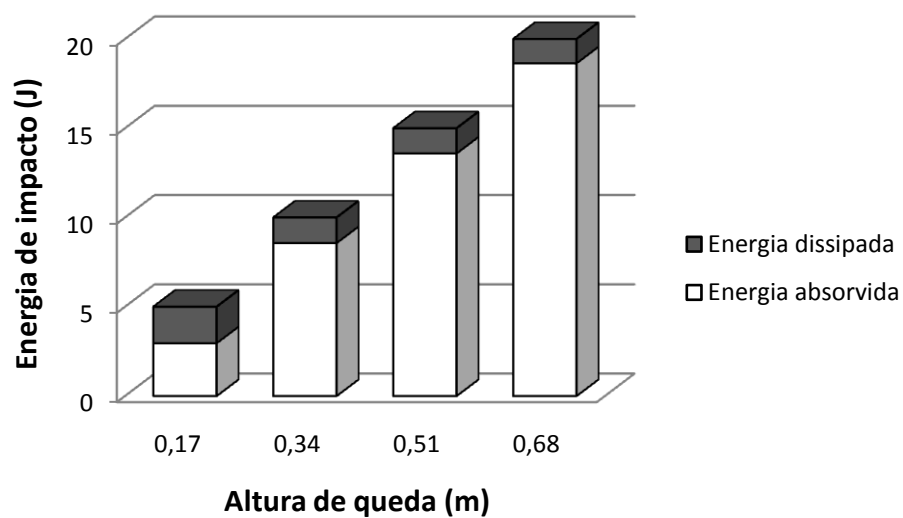


Fig. 30 - Balanço da energia nas estruturas sandwich carbono/cortiça de 30 mm de espessura

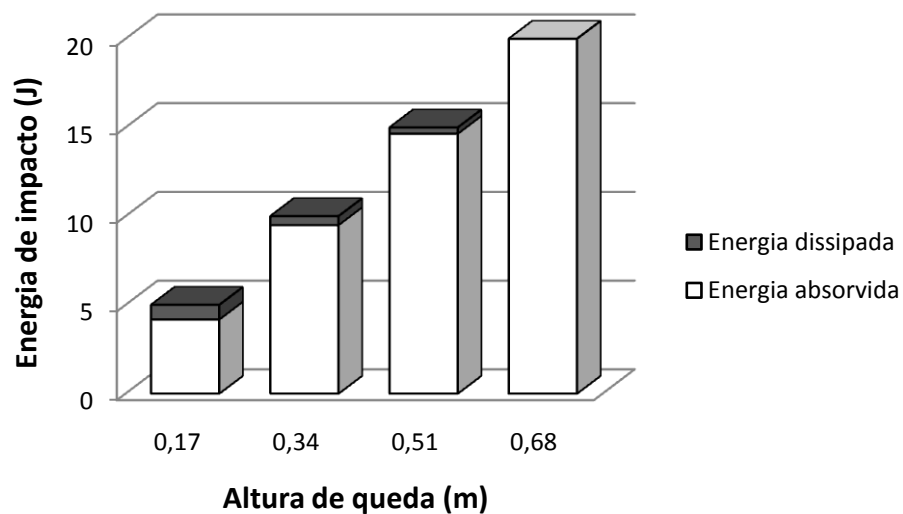


Fig. 31 - Balanço da energia nas estruturas sandwich carbono/Rohacell®

## 4.2 Ensaios de avaliação de resistência residual (flexão)

Esta secção é dedicada à apresentação de resultados relativos aos valores de carga e tensão de corte obtidos a partir dos ensaios de flexão. Será, posteriormente, efectuada a análise dos mesmos, comparando os resultados dos provetes impactados a diferentes níveis de energia com os provetes que não sofreram impacto.

### 4.2.1 Comportamento das estruturas sandwich à flexão

As Figs. 32 e 33 evidenciam as curvas típicas à flexão das estruturas sandwich com núcleo de cortiça e Rohacell®, respectivamente. Facilmente se observa que, as sandwich carbono/cortiça exibem um comportamento de um material dúctil, apresentando um deslocamento considerável e uma zona de cedência, enquanto as sandwich de Rohacell® se identificam como um material frágil, sem grandes variações do declive da recta antes de atingir a carga máxima. Deve notar-se que a parte inicial de cada curva não representa a flexão do provete, mas sim da borracha que foi colocada entre o provete e os pontos de carga.



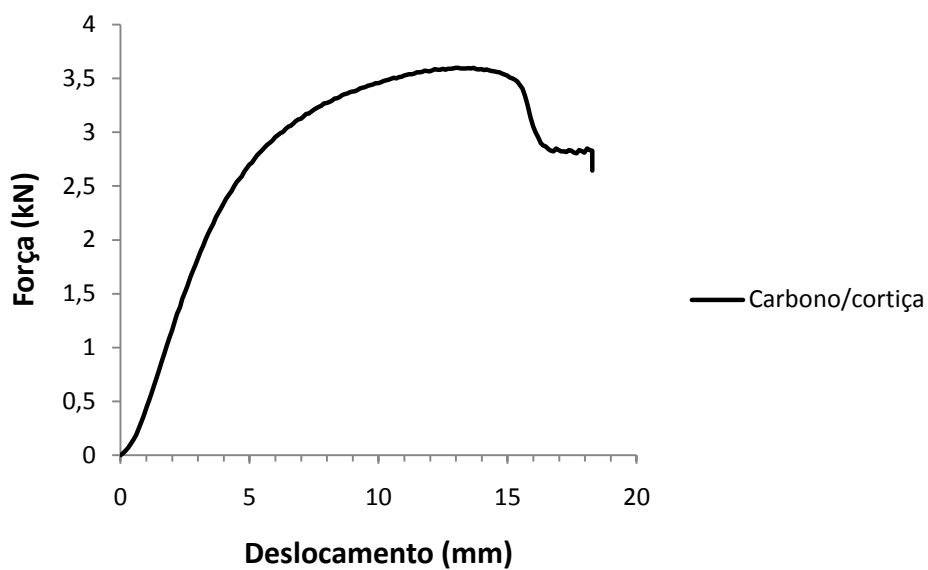


Fig. 32 – Comportamento típico à flexão das estruturas sandwich à base de cortiça

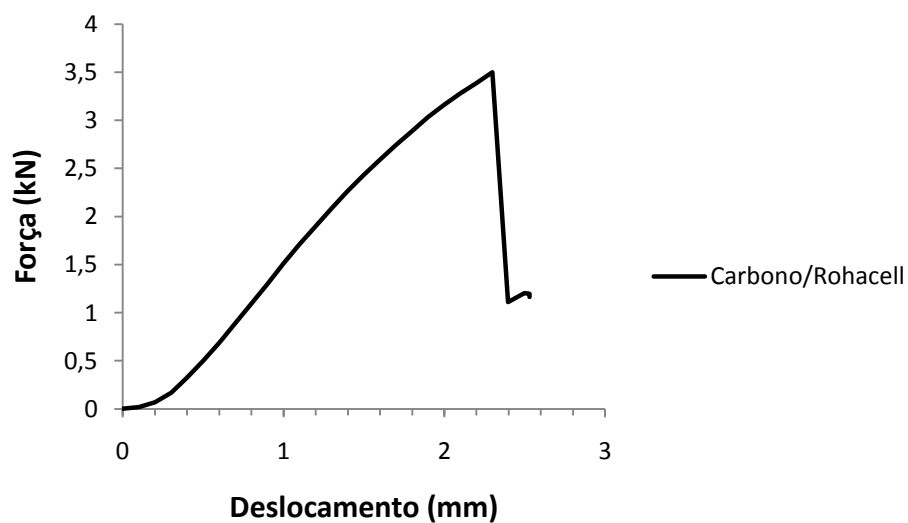
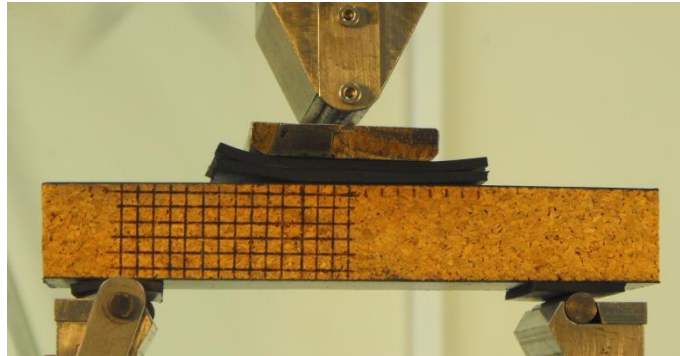


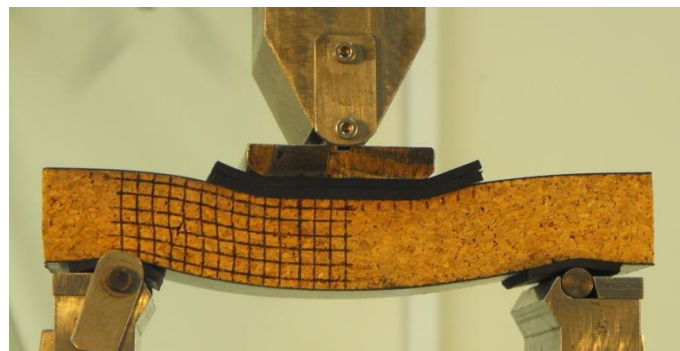
Fig. 33 – Comportamento típico à flexão das estruturas sandwich carbono/Rohacell®

#### 4.2.2 Mecanismos de falha

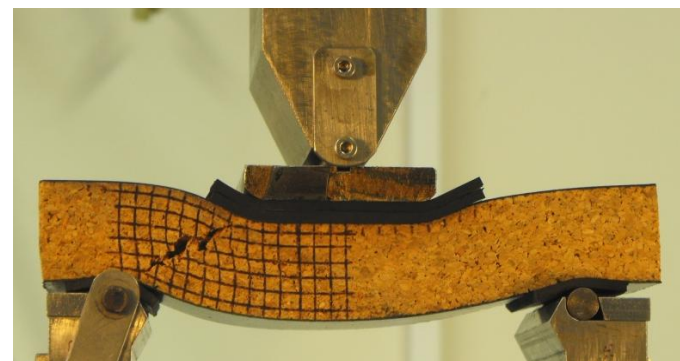
Todos os provetes com núcleo de cortiça apresentaram falha ao corte do núcleo na zona de impacto. A Fig. 34 ilustra as diferentes etapas de carregamento da amostra. As quadrículas desenhadas no núcleo do provete tiveram como finalidade uma melhor visualização da deformação do mesmo, associada aos esforços de corte.



(a)



(b)



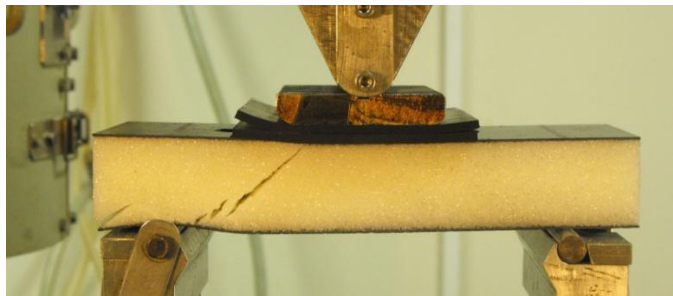
(c)

Fig. 34 – Etapas de carregamento à flexão de estruturas sandwich à base de cortiça: (a) Início do carregamento, (b) Deformação ao corte do núcleo com início de falha, (c) Progressão da falha ao corte do núcleo

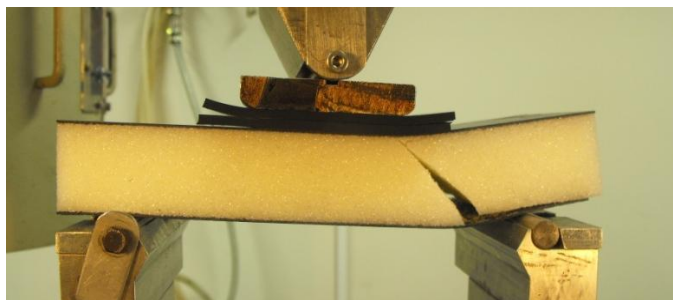
Por sua vez, as sandwich carbono/Rohacell® evidenciaram vários modos de falha distintos (Fig. 35), dos quais se destacam: falha por corte atravessando a zona de impacto com descoesão face-núcleo na face superior, falha por corte na região de contacto com o actuador e, falha na interface face-núcleo, por descolagem do adesivo utilizado, sendo a causa provável um defeito de fabrico dos provetes. A característica comum a estes mecanismos de falha é que em todos eles surgiu uma fenda no núcleo a 45° desde a face superior até à inferior. Uma justificação possível para a ocorrência desta variedade de mecanismos é a sensibilidade ao entalhe deste tipo de estruturas.



(a)



(b)



(c)

Fig. 35 – Mecanismos de falha das estruturas sandwich carbono/Rohacell®: (a) Falha por corte do núcleo na zona de impacto, (b) Falha por corte na região de contacto com o actuador, (c) Falha na interface face-núcleo

### **4.2.3. Carga máxima e tensão de corte**

Com o objectivo de comparar a resistência residual das estruturas sandwich à base de cortiça, foram traçados os gráficos das Figs. 36 e 37 que apresentam a carga máxima para cada um dos ensaios e nível de energia de impacto, em função da espessura do núcleo dos provetes. Deve referir-se que, embora o propósito da fase de manufactura dos materiais fosse obter provetes com espessuras exactamente idênticas dentro do mesmo conjunto, este não foi alcançado plenamente devido a um processo de compactação pouco eficaz. Em consequência disso, e uma vez que as quantidades utilizadas de granulado de cortiça e epoxy foram as mesmas para todos os provetes, estes não possuem densidades idênticas devido à variação de espessura resultante do processo de compactação. Deste modo, o aumento de espessura traduz-se numa menor densidade das amostras. Apesar deste aspecto não se reflectir em qualquer influência notória durante os ensaios de impacto, a variação da espessura do núcleo foi considerada nos ensaios de flexão, uma vez que durante a realização dos mesmos se notou uma possível influência deste parâmetro na resistência residual das estruturas sandwich em estudo.

Da análise do gráfico da Fig. 36 constata-se que, para o caso dos provetes com dano de impacto, quanto maior a energia de impacto menor a força suportada pelas amostras de teste. Curiosamente, esta tendência não é tão evidente para as situações de impacto a 10 e 15J. Isto aponta, como já dissemos, para uma possível influência da espessura do núcleo na resistência residual. Esta ideia é reforçada ao observar os ensaios realizados sem impacto, cuja espessura do núcleo se distâcia mais das restantes. De facto, tendo uma espessura mais elevada, os provetes sem impacto apresentaram uma menor resistência; ainda assim, os valores de força foram superiores aos dos provetes impactados com 20 J de energia.

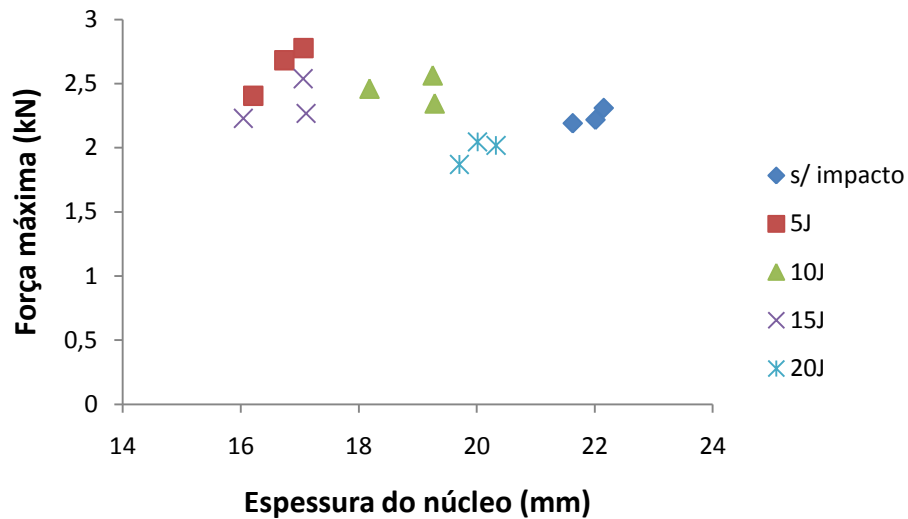


Fig. 36 – Historial da força máxima nos provetes carbono/cortiça com 20 mm de espessura nominal

Observando o gráfico da Fig. 37 que exhibe os valores de força máxima suportados pelas estruturas sandwich carbono /cortiça com uma espessura nominal de 30 mm, verifica-se que os valores de força suportados pelas amostras impactadas são muito idênticos. Neste caso, o dano de impacto parece não ter nenhuma influência, o que leva a concluir que para maiores espessuras do núcleo, o dano de impacto é muito pouco importante na resistência residual à flexão deste tipo de estruturas. Também neste caso não se nota a influência de eventuais desvios na espessura nominal do núcleo. Por sua vez, esta influência parece ser escassamente sentida nos ensaios realizados sem impacto, onde é visível um afastamento considerável da espessura do núcleo em relação às restantes amostras de teste.

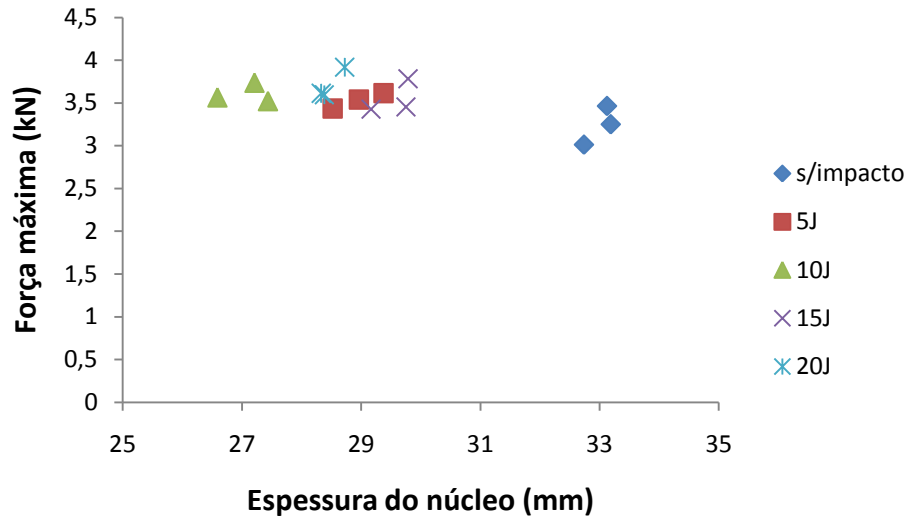


Fig. 37 - Historial da força máxima nos provetes carbono/cortiça com 30 mm de espessura nominal

Os gráficos das Figs. 38 e 39 expressam os valores de tensão de corte máxima para cada ensaio realizado das estruturas sandwich carbono/cortiça em função da espessura do núcleo, dissociados por níveis de energia de impacto e provetes não impactados. A tensão de corte máxima foi obtida a partir dos valores da força máxima recorrendo à equação (5), tal como recomendado pela norma ASTM C 393/C 393M [43].

$$F_s^{ult} = \frac{P_{max}}{d + c \ b} \quad (5)$$

onde,  $F_s^{ult}$  é a resistência última ao corte do núcleo, MPa

$P_{max}$  é a máxima força antes da falha, N

$t$  é a espessura nominal da face, mm

$d$  é a espessura da sandwich, mm

$c$  é a espessura do nucleo, mm

$b$  é a largura da sandwich, mm

Os gráficos da tensão de corte representados nas Figs. 38 e 39 vão de encontro aos gráficos das Figs. 36 e 37, onde se exibem os valores da força máxima suportada pelas amostras em cada ensaio. Porém, há uma incongruência no gráfico da Fig. 38, onde a tensão de corte dos provetes impactados com 15 J de energia é superior àqueles impactados com 10 J de energia, contrariamente ao que sucedeu com a força. Este facto só mostra que a tensão de corte é um factor de menor importância relativamente à força, uma vez que sofre duplamente a influência da espessura. A variação de espessura é primeiramente reflectida na força que o provete foi capaz de suportar, notando-se uma posterior influência aquando da aplicação da fórmula da tensão de corte, onde se divide a carga suportada pela espessura do provete.

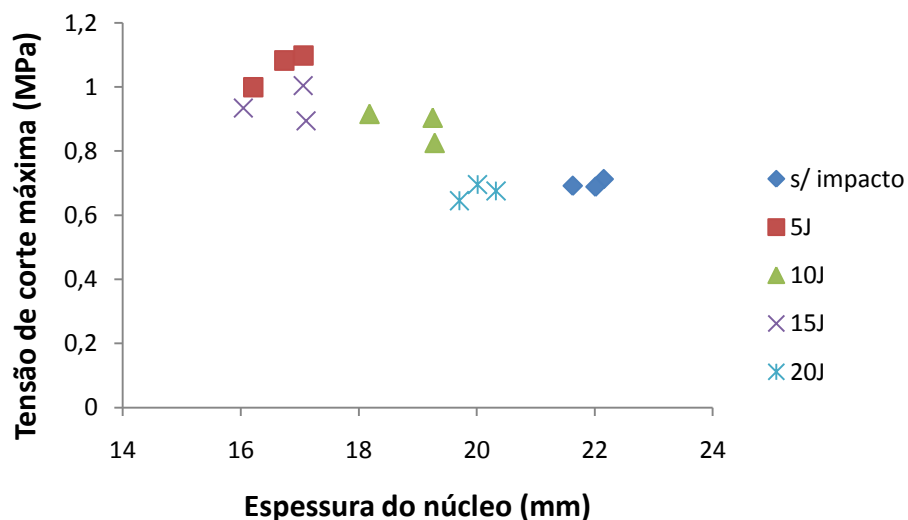


Fig. 38 - Historial da tensão de corte máxima nos provetes carbono/cortiça com 20 mm de espessura nominal

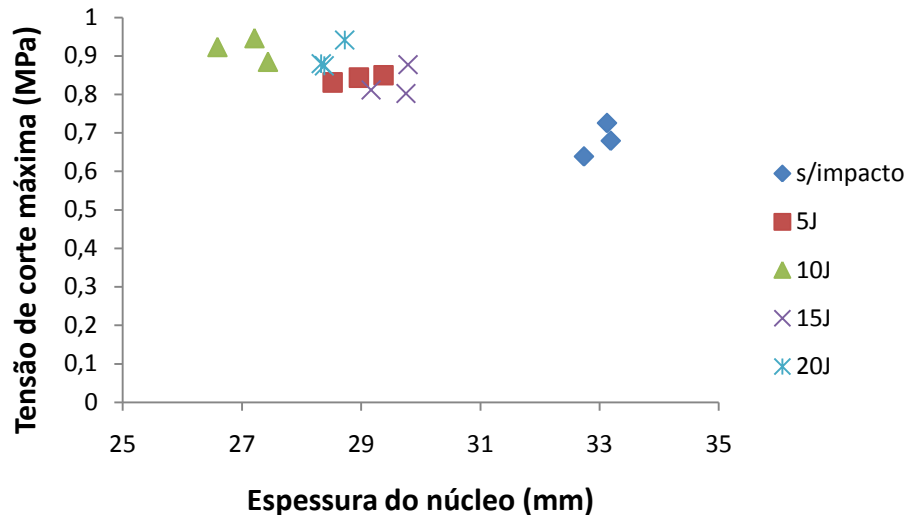


Fig. 39 - Historial da tensão de corte máxima nos provetes carbono/cortiça com 30 mm de espessura nominal

A análise anterior dos valores de carga máxima e tensão de corte não foi realizada para os ensaios dos provetes sandwich carbono/Rohacell®, devido à grande dispersão nos mecanismos de falha exibidos pelos mesmos.

### 4.3 Análise e caracterização do dano

Nesta secção apresentam-se as fotografias dos provetes sujeitos ao impacto, por ordem crescente de energia, de modo a ser possível uma comparação visual dos danos ocorridos nos diferentes materiais. Serão ainda exibidos os resultados relativos à quantificação da extensão do dano.

#### 4.3.1 Dano nas faces

Da observação das imagens obtidas do dano nas faces (Fig. 40), pode facilmente constatar-se, como era esperado, que o dano aumenta com o aumento do nível de energia a que ocorreu o impacto. Comparando os três tipos de material estudados, verifica-se que, visualmente, o dano infligido nas sandwich de cortiça com espessuras de 20 e 30 mm, é idêntico. Porém, a extensão do dano é mais pronunciada nas sandwich de Rohacell® para todos os níveis de energia. Curiosamente, para o nível de energia de 5 J, não se observa nenhum dano nas sandwich de cortiça, enquanto nas sandwich de Rohacell® é perceptível uma ligeira marca do impactor. Note-



se que as imagens relativas a este nível de energia estão ampliadas em relação às restantes para uma melhor detecção de alterações provocadas no material. Outra constatação importante é que para os casos das sandwich de cortiça, não há, em nenhum deles, perfuração da face. Já no caso da sandwich de Rohacell<sup>®</sup>, para os níveis de energia de 15 e 20 J, ocorreu perfuração das faces, estando o material do núcleo visível. O dano assume uma forma quase circular para todos os casos aqui representados, resultado da geometria do impactor.

Analisando a extensão do dano através do gráfico da Fig. 41, que apresenta a área do dano em função do nível de energia de impacto, reforça-se a ideia descrita anteriormente pela visualização das imagens. De facto, a área do dano cresce com a energia de impacto, sendo que para níveis de energia mais elevados este aumento de área de dano nas faces já não é tão notório como para níveis de energia mais baixos. Isto porque a área do dano aproxima-se da área de contacto do impactor. Também é notória, pela análise do gráfico, uma maior extensão do dano na sandwich com núcleo de Rohacell<sup>®</sup>.

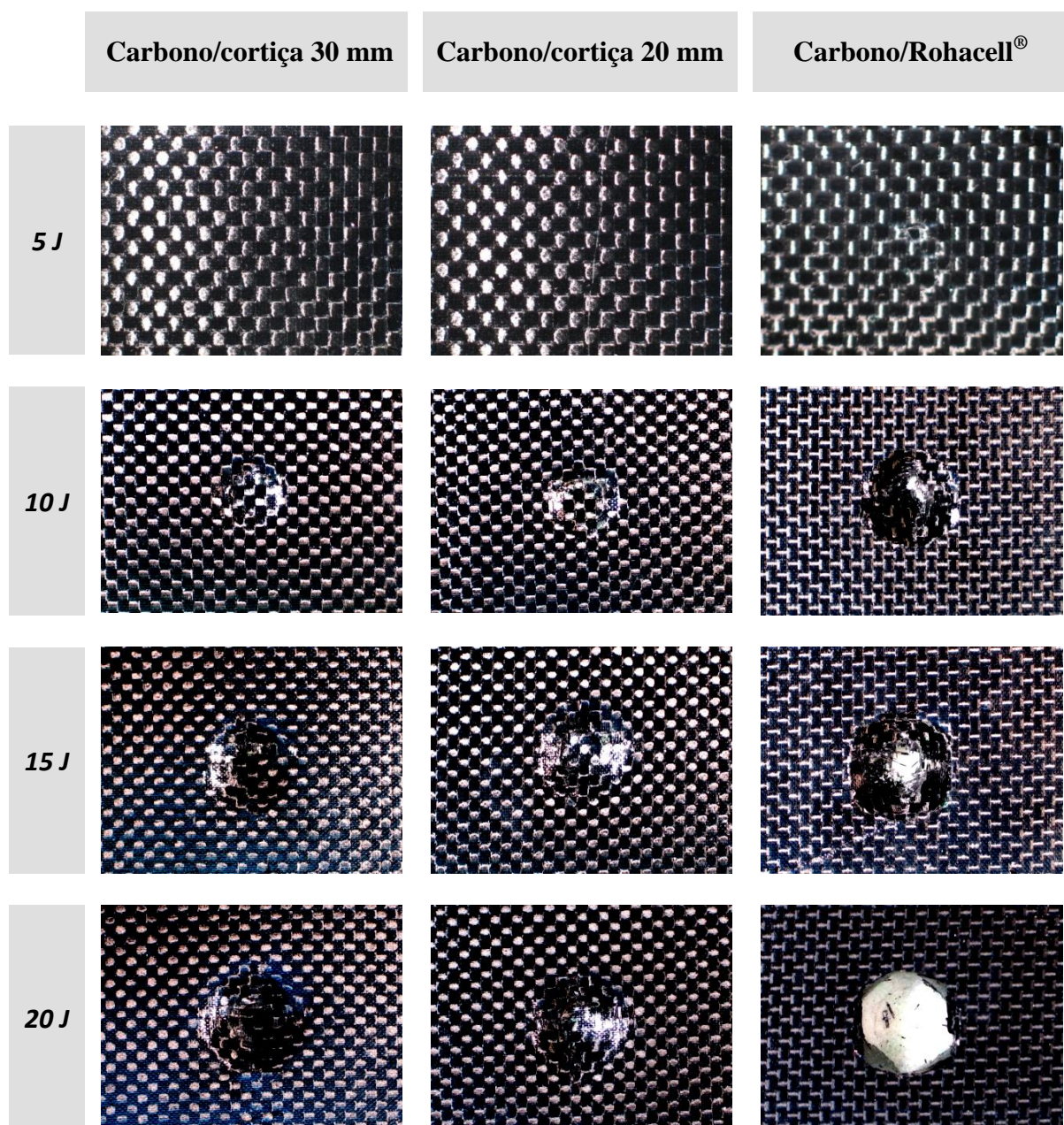


Fig. 40 – Dano nas faces

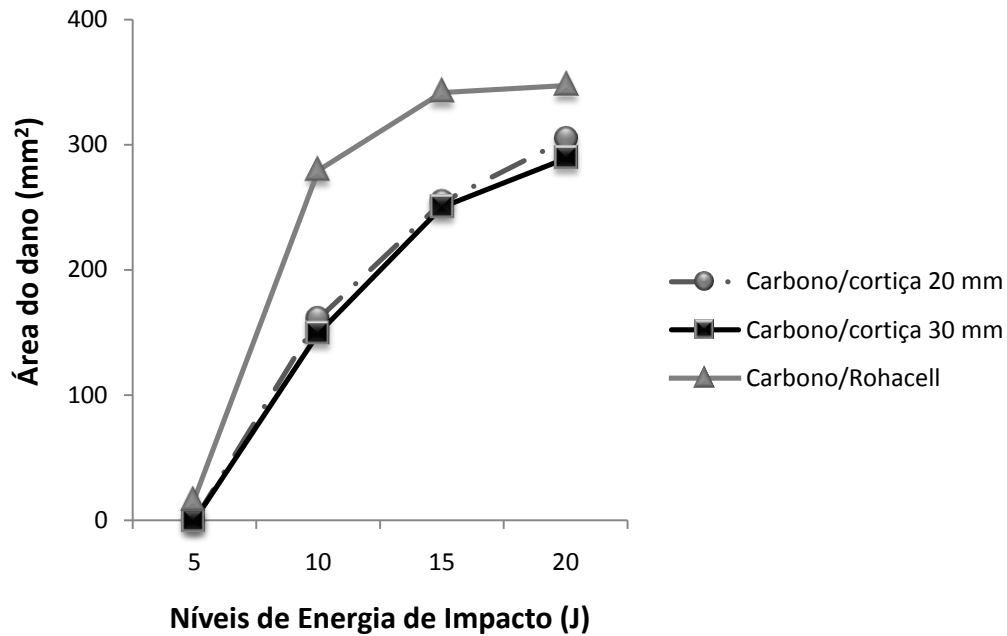


Fig. 41 – Área de dano nas faces

#### 4.3.2 Dano no núcleo

Findo os ensaios, o seccionamento dos provetes permitiu uma caracterização do dano no interior do material. As imagens obtidas reflectem o estado do dano para os materiais em estudo (Fig. 42), dependendo da energia de impacto. Pode-se constatar que, para o nível de energia de 5J, as sandwich de cortiça não apresentam qualquer tipo de dano visível. Pelo contrário, a sandwich de Rohacell® apresenta dano na zona do núcleo imediatamente abaixo da região de impacto. Este facto é interessante uma vez que tal não era previsível, tendo em conta que o dano na face não era tão significativo. À medida que a energia de impacto aumenta, o dano faz-se notar, principalmente nas sandwich carbono/Rohacell® quando comparadas com as sandwich carbono/cortiça, cujo dano mantém um nível aparentemente semelhante. Para os mesmos níveis de energia, as sandwich à base de cortiça aparentam sofrer apenas deformação elástica, exibindo uma ténue curvatura na região de impacto em relação ao plano das faces para as energias de impacto de 15 e 20 J, o que pode ser explicado pelas propriedades da cortiça. Já as sandwich com núcleo de Rohacell® sugerem a ocorrência de deformação plástica, ocorrendo perfuração parcial para os níveis de energia referidos. Deve também ser mencionado que as pequenas fissuras, visíveis em algumas das fotografias, são resultado dos testes de flexão devido à falha do núcleo ao corte.



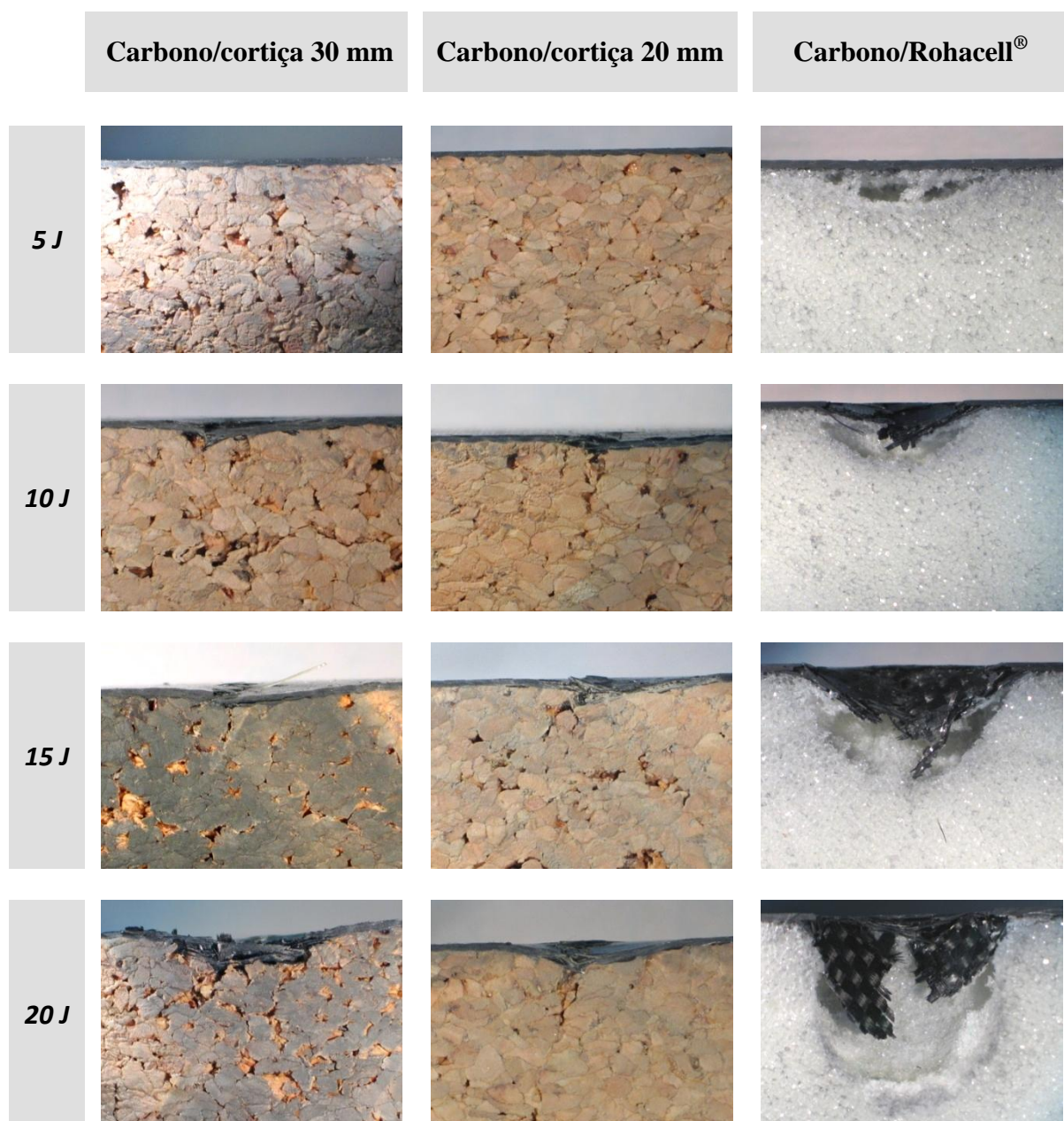


Fig. 42 - Dano no núcleo

A partir da Fig. 43, constata-se que ambas as sandwich à base de cortiça exibem danos com áreas semelhantes. No entanto, a extensão do dano interno na sandwich de cortiça de 30 mm é ligeiramente inferior à de 20 mm. Esta conclusão é reforçada pela caracterização da extensão do dano nas faces em que, também neste caso, o dano é tenuemente menor na sandwich carbono/cortiça 30 mm. Curiosamente, na análise do balanço energético realizado pós-impacto, este material apresenta uma maior dissipação de energia, o que leva a concluir que quanto maior for a capacidade de dissipar energia, menor será o dano com a energia absorvida. No que diz respeito às sandwich de Rohacell®, a área do dano é visivelmente superior.

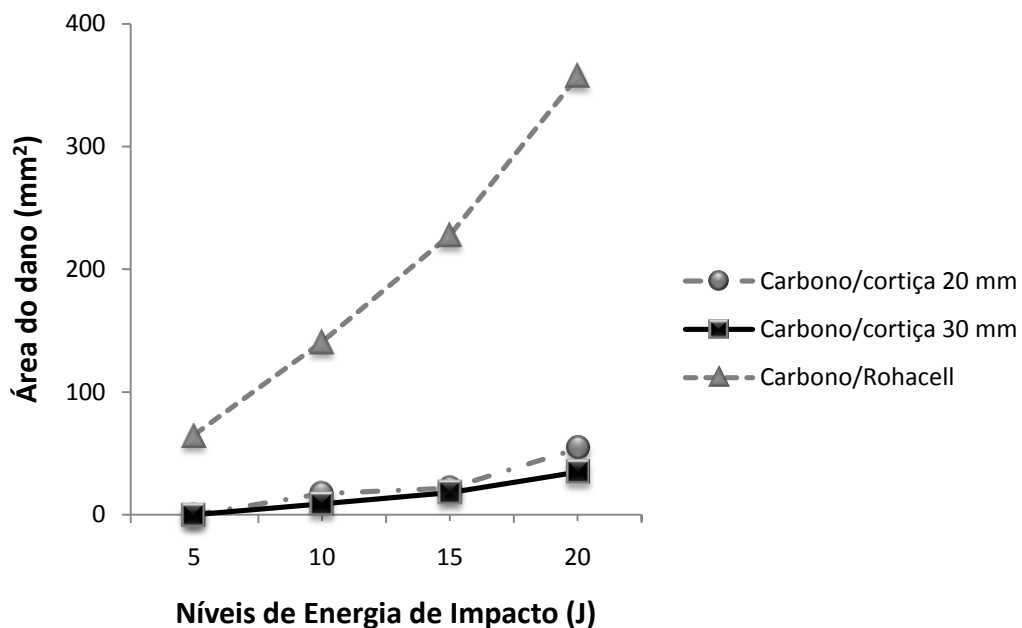


Fig. 43 – Área de dano no núcleo

Relativamente à profundidade do dano (Fig. 44), esta aumenta de uma forma pronunciada para a sandwich de núcleo de Rohacell®, chegando a atingir uma profundidade de 20 mm (2/3 da espessura) para o nível de energia mais elevado. Tal como nas análises realizadas anteriormente, também na profundidade do dano se nota pouca discrepância entre os resultados da sandwich de cortiça de 30 mm e os da de 20 mm.

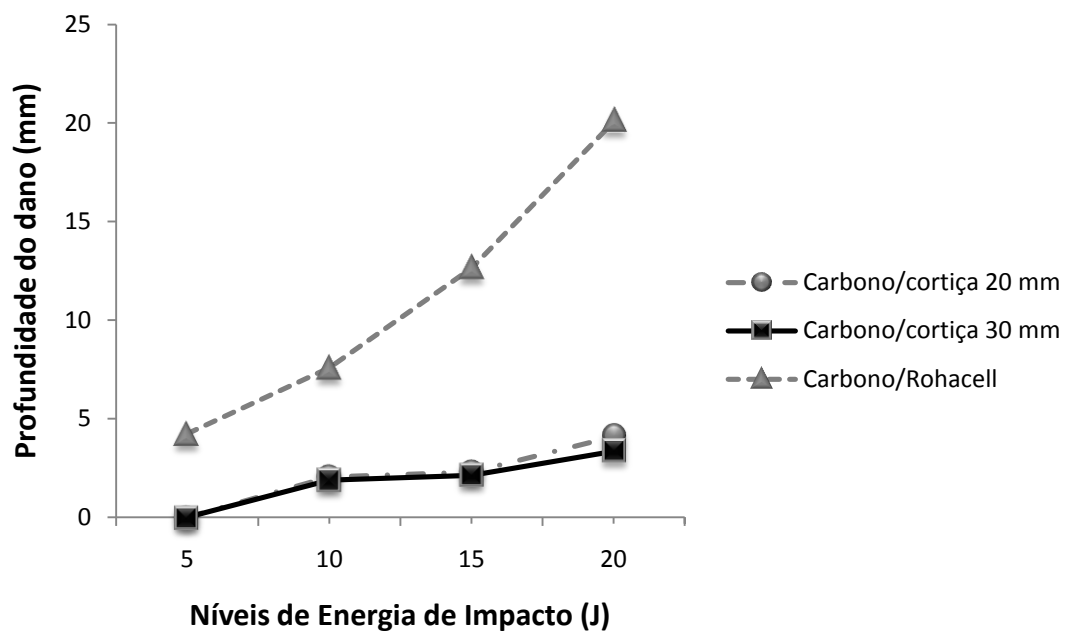


Fig. 44 – Profundidade do dano no núcleo

## Capítulo 5

# Conclusões e desenvolvimentos futuros

Da análise dos resultados experimentais obtidos neste trabalho é possível destacar as seguintes conclusões:

- Todas as estruturas sandwich à base de cortiça revelaram maior resistência ao impacto relativamente às de núcleo de Rohacell<sup>®</sup>, por suportarem cargas máximas mais elevadas, apresentando menores dimensões de dano;
- A extensão do dano de impacto, é para todos os casos, substancialmente maior nos provetes carbono/Rohacell<sup>®</sup> do que nos provetes à base de cortiça. A profundidade do dano é o parâmetro onde se nota mais esta disparidade entre resultados.
- A absorção de energia com o aumento do nível de energia de impacto é claramente mais notória para as amostras de carbono/Rohacell<sup>®</sup>, sendo que para o nível de energia mais elevado (20 J) estas estruturas sandwich absorveram toda a energia inicial sob a forma de mecanismos de dano;
- A espessura do núcleo das estruturas sandwich carbono/cortiça não mostrou uma influência significativa na resistência ao impacto. No entanto, as sandwich com núcleo de cortiça mais espessas demonstraram uma capacidade ligeiramente superior de dissipar energia em relação às menos espessas, o que resultou numa menor extensão de dano.
- Todas as amostras carbono cortiça apresentaram um mecanismo de falha por corte nos ensaios de flexão. Já as amostras com núcleo de Rohacell<sup>®</sup> apresentaram uma variedade de mecanismos de falha, o que leva a concluir que estas amostras são muito sensíveis ao entalhe.

- O dano de impacto mostrou ter influência na resistência residual à flexão das estruturas sandwich carbono/cortiça de espessura nominal de 20 mm. Quanto maior o dano, menor a força suportada por estas estruturas. Por sua vez, a resistência residual das estruturas com núcleo de cortiça e uma espessura nominal de 30 mm não é afectada pelo dano de impacto e espessura do núcleo. Conclui-se, portanto, que neste tipo de estruturas o dano só tem influência na resistência residual de estruturas sandwich menos espessas.

Como propostas de trabalhos futuros sugere-se:

- avaliar a possibilidade de utilização de aglomerados naturais de cortiça como material de núcleo em sandwiches projectadas especificamente para suportarem cargas de impacto, uma vez que este tipo de material deverá possuir características semelhantes às dos aglomerados de cortiça-epoxy, em termos de resistência ao impacto, apresentando a vantagem de possuírem uma menor densidade (com prejuízo da sua resistência em condições de carregamento estático);
- melhorar o processo de fabrico dos aglomerados de cortiça-epoxy, procurando minimizar possíveis desvios dimensionais que possam afectar as propriedades globais do material;
- estender o presente estudo a outro tipo de materiais usados tradicionalmente na indústria aeronáutica (outras espumas, estruturas em ninho de abelha, etc), permitindo aferir sobre o real potencial de utilização dos aglomerados de cortiça no âmbito de aplicações aeronáuticas.



## Referências bibliográficas

- [1] Castro, O., “Caracterização de estruturas tipo sandwich com aglomerados de cortiça para aplicação aeroespacial”, Ms Thesis, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2008.
- [2] Silva, J., Devezas, T., Silva, A., Gil, L., Nunes, C., Franco, N., “Exploring the use of cork based composites for aerospace applications”, V International Materials Symposium, 2009
- [3] <http://www.apcor.pt/artigo.php?art=292>, último acesso em 01/06/2009.
- [4] Gil, L., *A cortiça como material de construção – Manual Técnico*, APCOR, 2007.
- [5] Fortes, M.A., 1989. *A Cortiça*. Colóquio Ciências N.4, Jan/Abr, 35-60.
- [6] Bull, P.H., “Damage tolerance and residual strength of composite sandwich structures”, KTH Aeronautical and Vehicle Engineering, 2004, Stockholm –Sweden.
- [7] Hildebrand, M.; “A Comparison of FRP-sandwich Penetrating impact test methods”; VTT publications 281; Technical Research Centre of Finland; ESPOO; Finland; 1996.
- [8] Foo, C., C., “A model to predict low-velocity impact response and damage in sandwich composites”, Composites Science and Technology, 2008, 1348-1356.
- [9] Hazizan, A., M., Cantwell, W., J., “The low velocity impact response of foam based sandwich structures”, Composites: Part B: Eng 2003, 697–687.
- [10] Schubel P., Luo J., Daniel I., “Low velocity impact behavior of composite sandwich panels”, Composites, Part A: Applied Science and Manufacturing, 2005;1389–1396.
- [11] Leijten, J., Bersee, H., Bergsma, O., Beukers, A., “Experimental study of the low-velocity impact behaviour of primary sandwich structures in aircraft”, Composites: Part A 40, 2009, 164-175.
- [12] Ulven C., Vaidya, U., Hosur, M., “Effect of projectile shape during ballistic perforation of VARTM carbon/epoxy composite panels”, Composite Structures 2003; 143–50.

- [13] Villanueva R., Cantwell J., “The high velocity impact response of composite and FML reinforced sandwich structures”, *Composites Science and Technology*, 2003, S1–S20.
- [14] Abrate, S., *Impact on Composite Structures*, Cambridge University Press, Cambridge, 1998.
- [15] Ferreira, L., “Avaliação do dano em compósitos laminados devido a impactos de baixa velocidade, Phd Thesis, Universidade de Coimbra, 2007.
- [16] Naik, N., Shrirao P., “Composite structures under ballistic impact”, *Composites Structures*, 2004, 579–90.
- [17] Olsson, R., “Mass criterion for wave controlled impact response of composite plates”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2000, 879–87.
- [18] Olsson, R., “Analytical prediction of large mass impact damage in composite laminates”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2001, 1207–15.
- [19] Olsson, R., “Closed form prediction of peak load and delamination onset under small mass impact”, *Composites Structures*, 2003, 341–9.
- [20] Nettles, A., Douglas, M., “A comparison of quasi-static indentation to low velocity impact”, NASA/TP-2000-210481; 2000.
- [21] Moody, R., Vizzini, A., “Damage Tolerance of Composite Sandwich Structures”, DOT/FAA/AR-99/91, January 2000.
- [22] Gustin, J., Joneson, A., Mahinfalah, M., Stone, J., “Low velocity impact of combination Kevlar/carbon fibre sandwich composites”, *Composites Structures* 2005, 396–406.
- [23] Torre, L., Kenny, J., “Impact testing and simulation of composite sandwich structures for civil transportation”, *Composites Structures*, 2000, 257–67.
- [24] Hosur, M., Mohammed, A., Zainuddin, S., Jeelani, S., “Processing of nanoclay filled sandwich composites and their response to low-velocity impact loading”, *Composites and Structures* 82, 2008, 101-116.
- [25] Tsang P., “Impact resistance and damage tolerance of composite sandwich panels”, PhD Thesis, MIT, 1994.

- [26] Fatt, M., Park, K., “Dynamic models for low-velocity impact damage of composite sandwich panels”, *Composite Structures* 52 Part B, 2001, 353–64.
- [27] Nettles, A. Lance, D., Hodge A., “An Examination of Impact Damage in Glass/Phenolic and Aluminum Honeycomb Core Composite Panels”, NASA Technical Paper 3042, Marshall Space Flight Center, 1990.
- [28] Christopherson, J., Mahinfalah, M., Jazar, G., Aagaah, M., “An Investigation on the Effect of Small Mass Impact on Sandwich Composite Plates”, *Composite Structures*, Vol. 67, No. 3, 2005, pp. 299-306.
- [29] Lendze, T., Wojtyra, R., Guillaumat, L., Biateau, C., Imielińska, K., “Low velocity impact damage in glass/polyester composite sandwich panels”, *Advances in Materials Science*, Vol. 6, N° 1, 2006.
- [30] Burton, W., Noor, A., “Structural analysis of the adhesive bond in a honeycomb core sandwich panel”, *Finite Element Analysis Design*, 1997, 213–27.
- [31] Fatt, H., Park, K., “Dynamic models for low-velocity impact damage of composite sandwich panels”, Part A: Deformation, *Composite Structures* 52, 2001, 353–64.
- [32] Anderson, T., “An investigation of SDOF models for large mass impact on sandwich composites” *Composites Structures: Part B*, 2005, 135–42.
- [33] Wu, C., Sun, C., “Low velocity impact damage in composite sandwich beams”, *Composite Structures* 34, 1996, 21-27.
- [34] Bull, P., Edgren, F., “Compressive strength after impact of CRFP foam core sandwich panels in marine applications”, *Composites Part B: Engineering*, 1996, 535-541.
- [35] Kilic, Y., “Impact and Energy Absorption of Laminated and Sandwich Composites”, Phd Dissertation, MIT, 2008.
- [36] Sierakowsky, R., Chaturvedi, S., *Dynamic Loading and Characterization of Fiber-Reinforced Composites*, Wiley and Sons, 1997
- [37] Anderson, T., Madenci, E., “Experimental investigation of low velocity impact characteristics of sandwich composites”, *Composite Structures* 50, 2000, 239-247.

- [38] Shipsha, A., Zenkert, D., “Compression-after-Impact Strength of Sandwich Panels with Core Crushing Damage”, *Applied Composite Materials*, Vol. 12, 2005, pp. 149-164.
- [39] Hodge, A., Nettles, A., *A novel method of testing the shear strength of thick honeycomb composites*, National Aeronautics and Space Administration, Washington, 1991.
- [40] Richardson, M., Wisheart, M., “Review of low-velocity impact properties of composite materials”, *Composites Part A*, 1996, 1123-1131.
- [41] Nettles, A., “The effects of compressive preloads on the compression after impact strength of carbon/epoxy”, National Aeronautics and Space Administration, Washington, 1992.
- [42] Li, G., Muthyala, V., “Impact characterization of sandwich structures with an integrated orthogrid stiffened syntactic foam core”, *Composites Science and Technology*, 2008, 2078–2084.
- [43] C393/C393M–06 - “Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure”; ASTM, 2006.
- [44] ISO 6603-2 – “Plastics - Determination of puncture impact behaviour of rigid plastics - Part 2 Instrumented impact testing”, ISO, 2000.
- [45] D6264/D6264M – “Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer-Matrix Composite to a Concentrated Quasi-Static Indentation Force”, ASTM, 2007.
- [46] D7136/D7136M – 05 “Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event”; ASTM, 2005.
- [47] Broughton, W., Crocker, L., Gower, M., “Design Requirements for Bonded and Bolted Composite Structures”, NPL Report MATC(A)65, 2002.

## Anexos

### A.1. Características do tecido de carbono

=====

#### TECIDO CARBONO

Ref<sup>a</sup> 195

=====

- *Fio de Carbono* : HS 3 K
- *Peso ( Total )* : 196 g/m<sup>2</sup> ( + 4 % )
- *Peso ( Teia )* : 98 g/m<sup>2</sup> ( + 4 % )
- *Peso ( Trama )* : 98 g/m<sup>2</sup> ( + 4 % )
- *Espessura* : 0,25 mm ( + 15 % )
- *Fio/cm ( Teia )* : 4,9
- *Fio/cm ( Trama )* : 4,9
- *Malha* : Tafetá

### A.2. Ficha técnica da resina epoxy

#### ➤ SR 1500 - Epoxy laminating system

#### Description

This modified epoxy resin has been formulated to be cristalization free and low toxicity.

The formulation bases of SR 1500 are bisphenol A and F

This epoxy system has very good wet-out, degazing properties and an excellent adhesion to all type of reinforcements ( glass, aramid, carbon, polyester...)

Adjustable working time depending on the choice of the hardener

Respecting the ratio resin / hardener, the hardeners are mixable by weight, to achieve the most adapted reactivity for the application.

Glass transition : 75 - 81°C

The parts can be in service after 7 to 14 days @ 23°C for the hardeners SD 2507, SD 2505 and SD 2503.

Post-cure @ a minimum of 40°C for a Tg above 55°C.

Developped for : ship building, aeronautic, automotive prototypes, tool making.

Other applications : putty for coating with microspheres, syntactic core material, casting volume depending on the hardeners.

### Epoxy resin SR 1500

Aspect / color		Light yellow liquid
Viscosity (mPa.s)	@ 15 °C	
Rheometer	@ 20 °C	2 100
CP 50 mm	@ 25 °C	1 180
Shear rate 10 s <sup>-1</sup>	@ 30 °C	
	@ 40 °C	
Density (g/cm <sup>3</sup> )	@ 20 °C	1.13
Storage		Cristalization free

### Hardener SD 2505

Hardeners		<b>SD 2505</b>
Reactivity		<b>"standard"</b>
Aspect / colour		Yellow liquid
Viscosity (m.Pas)	@ 15 °C	550 ± 50
Rheometer	@ 20 °C	350 ± 50
CP 50 mm	@ 25 °C	240 ± 50
Shear rate 10 s <sup>-1</sup>	@ 30 °C	160 ± 50
	@ 40 °C	80 ± 20
Density (g/cm <sup>3</sup> )	@ 20 °C	1.00

## Mechanical properties

Curing cycles		SR 1500 / SD 2503	
		14 days @ AT*	24 h AT* + 16 h @ 60 °C
<b>Tension</b>			
Modulus of elasticity	N/mm <sup>2</sup>	3350	2860
Maximum resistance	N/mm <sup>2</sup>	77	71
Resistance at break	N/mm <sup>2</sup>	72	65
Elongation at max.load	%	3.6	4.7
Elongation at break	%	5.4	8.0
<b>Flexion</b>			
Modulus of elasticity	N/mm <sup>2</sup>	3300	2760
Maximum resistance	N/mm <sup>2</sup>	125	123
Elongation at max. resistance	%	4.6	6.4
Elongation at break	%	7.2	7.5
<b>Choc Charpy</b>			
Resilience	KJ/m <sup>2</sup>	12	30
<b>Glass transition</b>			
Tg1	°C	55	70
Tg1 max.	°C		76

### A.3. Propriedades físicas e mecânicas da espuma rígida Rohacell® 71 WF

➤ **Evonik Degussa Rohacell® 71 WF High Heat Grade Polymethacrylimide (PMI) Foam**

**Description:** ROHACELL® is produced by thermal expansion of a co-polymer sheet of methacrylic acid and methacrylonitrile. During the foaming process the copolymer sheet is converted to PMI - PolyMethacrylimide. Alcohol is used as a blowing agent, thus ROHACELL® contains no fluorinated carbon hydrates and is halogen free. It has a very homogeneous cell structure and isotropic properties.

**Specific Notes for this Material:** ROHACELL® WF (= grade with increased heat distortion resistance) is a closed-cell rigid foam plastic based on PMI (polymethacrylimide) which does not contain any CFCs. ROHACELL® WF serves as a core material in advanced sandwich components used in aircraft and spacecraft construction. Curing temperature up to 180°C (356°F). Curing pressure up to 0.70 MPa (100 psi). Sandwich components using ROHACELL® WF as core material can be realized in a single work step (= cocuring). The structural components can be manufactured in an autoclave and by means of RTM. ROHACELL® WF is easy to shape. Thermoformability is another advantage of the core material.

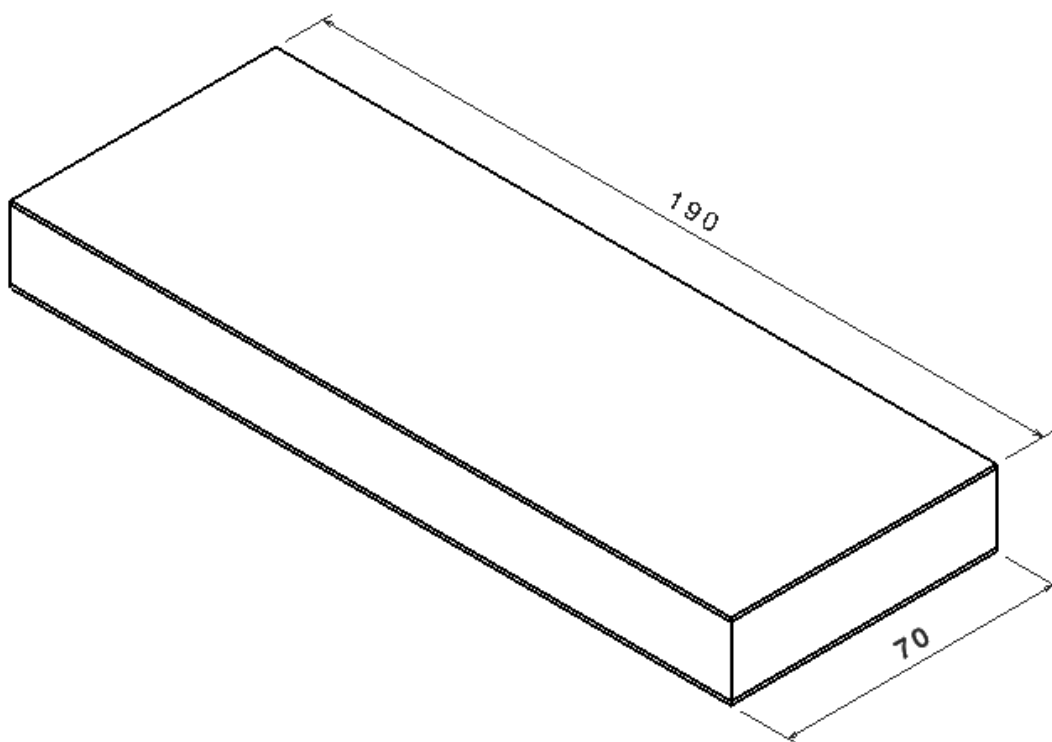
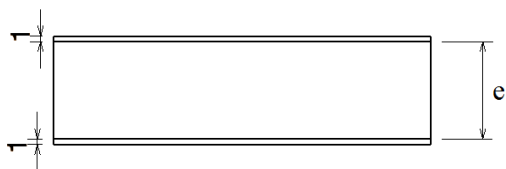
Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	0.0750 g/cc	0.00271 lb/in <sup>3</sup>	DIN 53420, ISO 845, ASTM D 1622

Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Tensile Strength at Break	2.20 MPa	319 psi	DIN 53455, ISO 527-2, ASTM D 638
Elongation at Break	3.00 %	3.00 %	DIN 53455, ISO 527-2, ASTM D 638
Modulus of Elasticity	0.105 GPa	15.2 ksi	ISO 527-2, ASTM D 638
Flexural Strength	2.90 MPa	421 psi	DIN 53423, ISO 1209, ASTM D 790
Compressive Strength	1.70 MPa	247 psi	DIN 53421, ISO 844, ASTM D 1621
Poissons Ratio	0.250	0.250	Calculated
Shear Modulus	0.0420 GPa	6.09 ksi	DIN 53294, ASTM C 273
Shear Strength	1.30 MPa	189 psi	DIN 53294, ASTM C 273

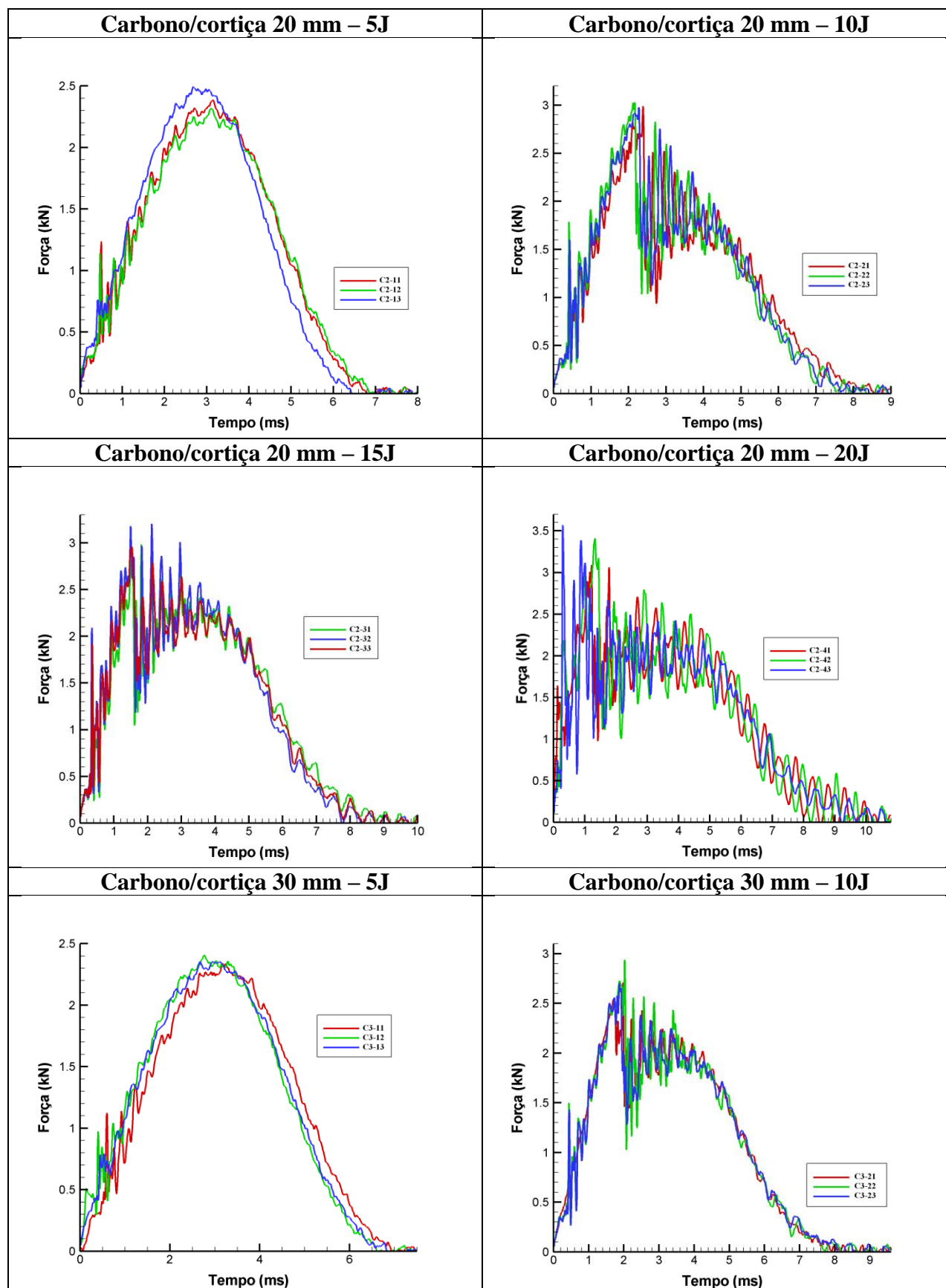
Thermal Properties	Metric	English	Comments
Maximum Service Temperature, Air	200 °C	392 °F	Heat Distortion Resistance; DIN 53424

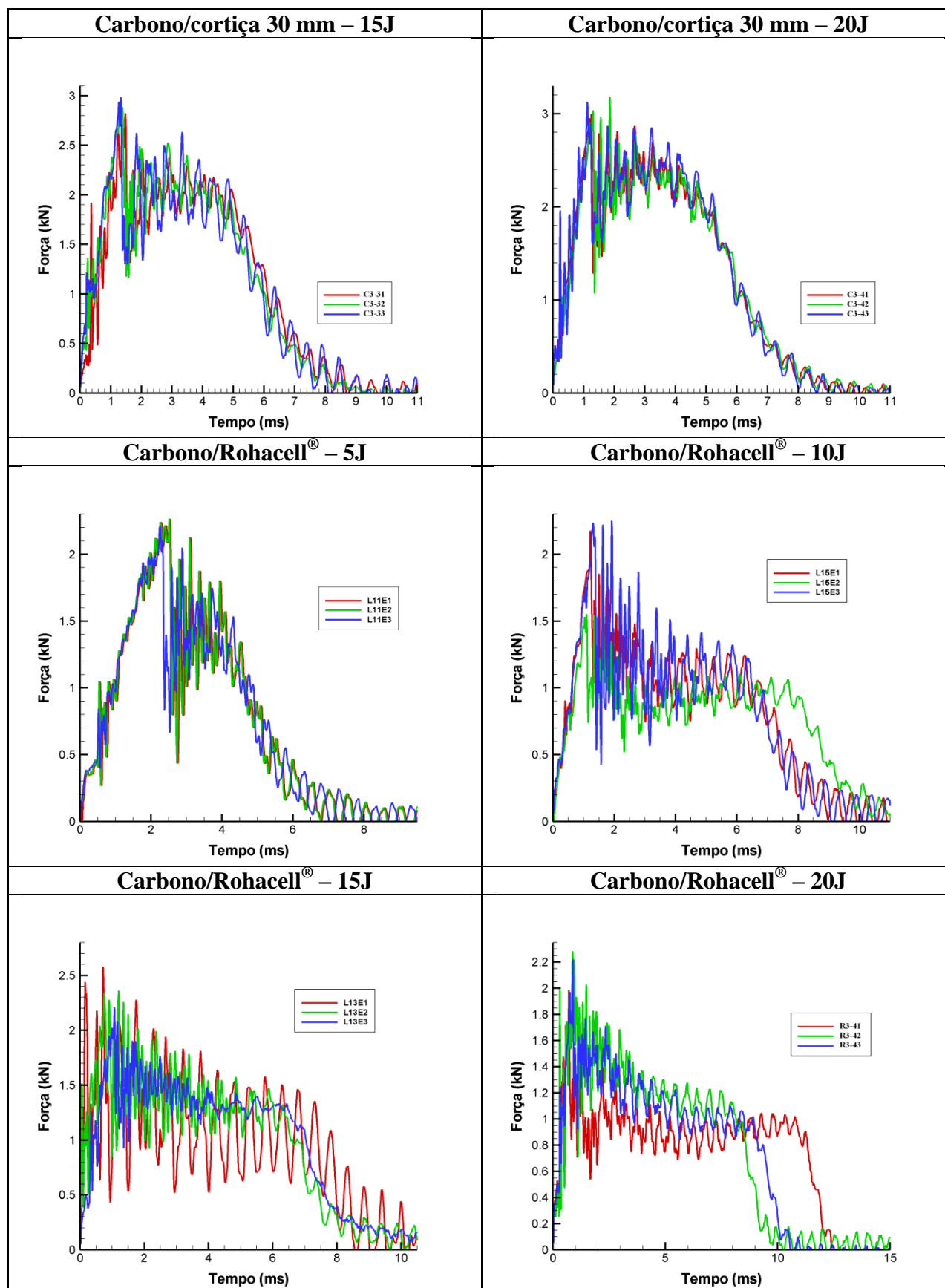


#### A.4. Esquematização das dimensões dos provetes sandwich

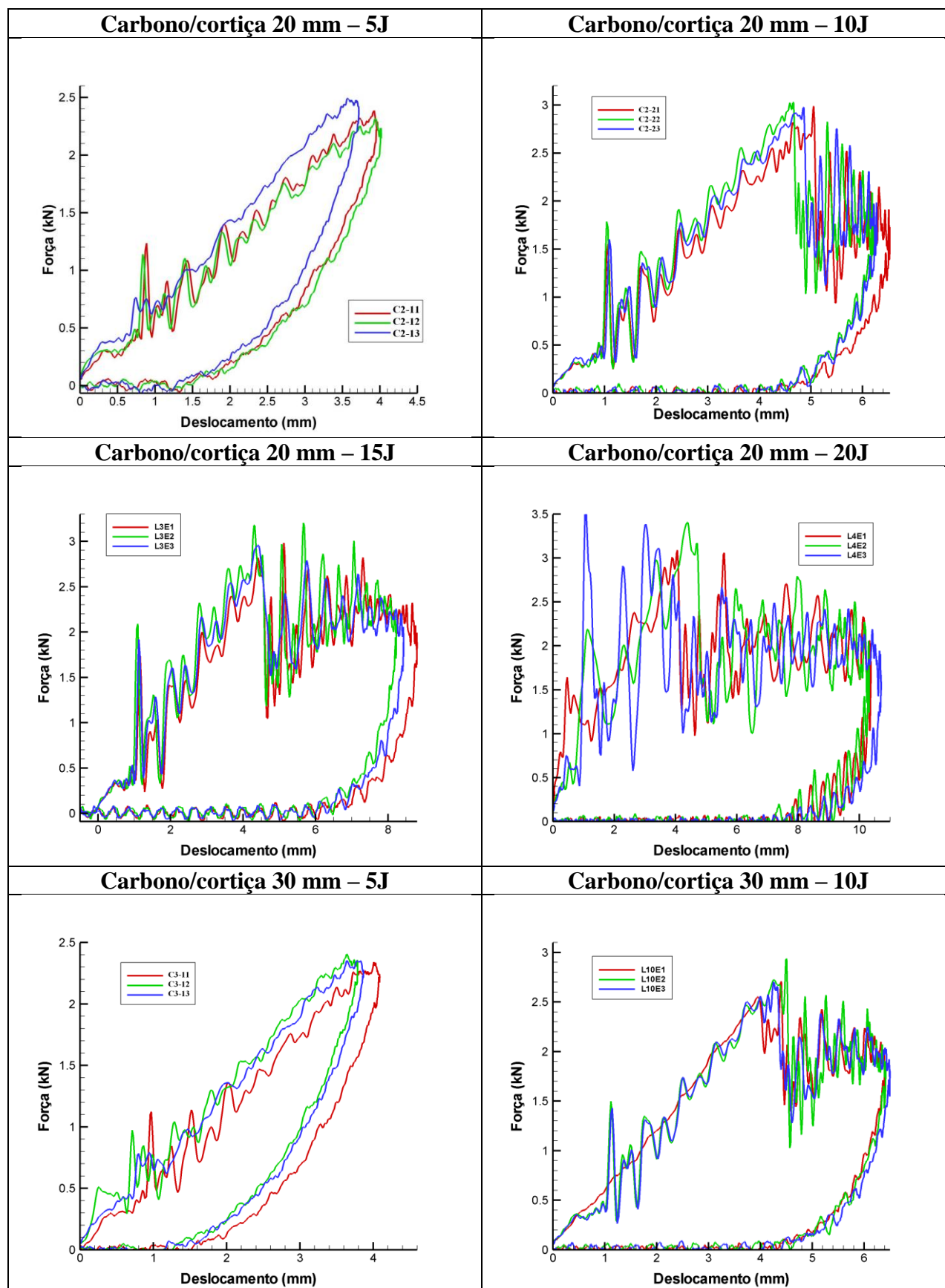


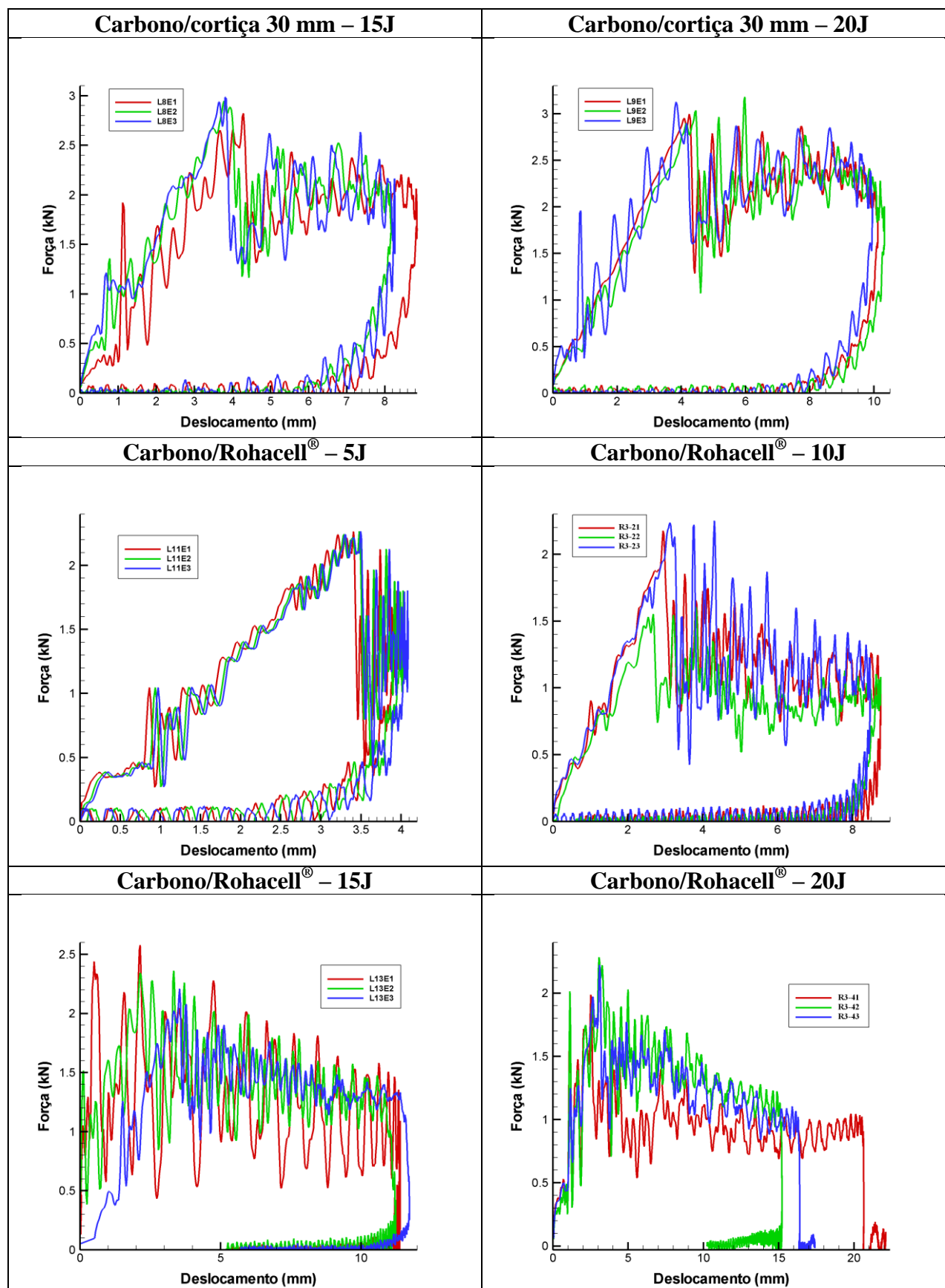
**Nota:** A espessura do núcleo (representada pela letra  $e$ ) varia consoante o tipo de material. As espessuras nominais compreendem valores de 18mm para o caso do núcleo de cortiça menos espesso e, 28mm para os núcleos de Rohacell e de cortiça com espessura superior.

**A.5. Resultados gráficos dos ensaios de impacto - Conjunto I – Curvas força-tempo**

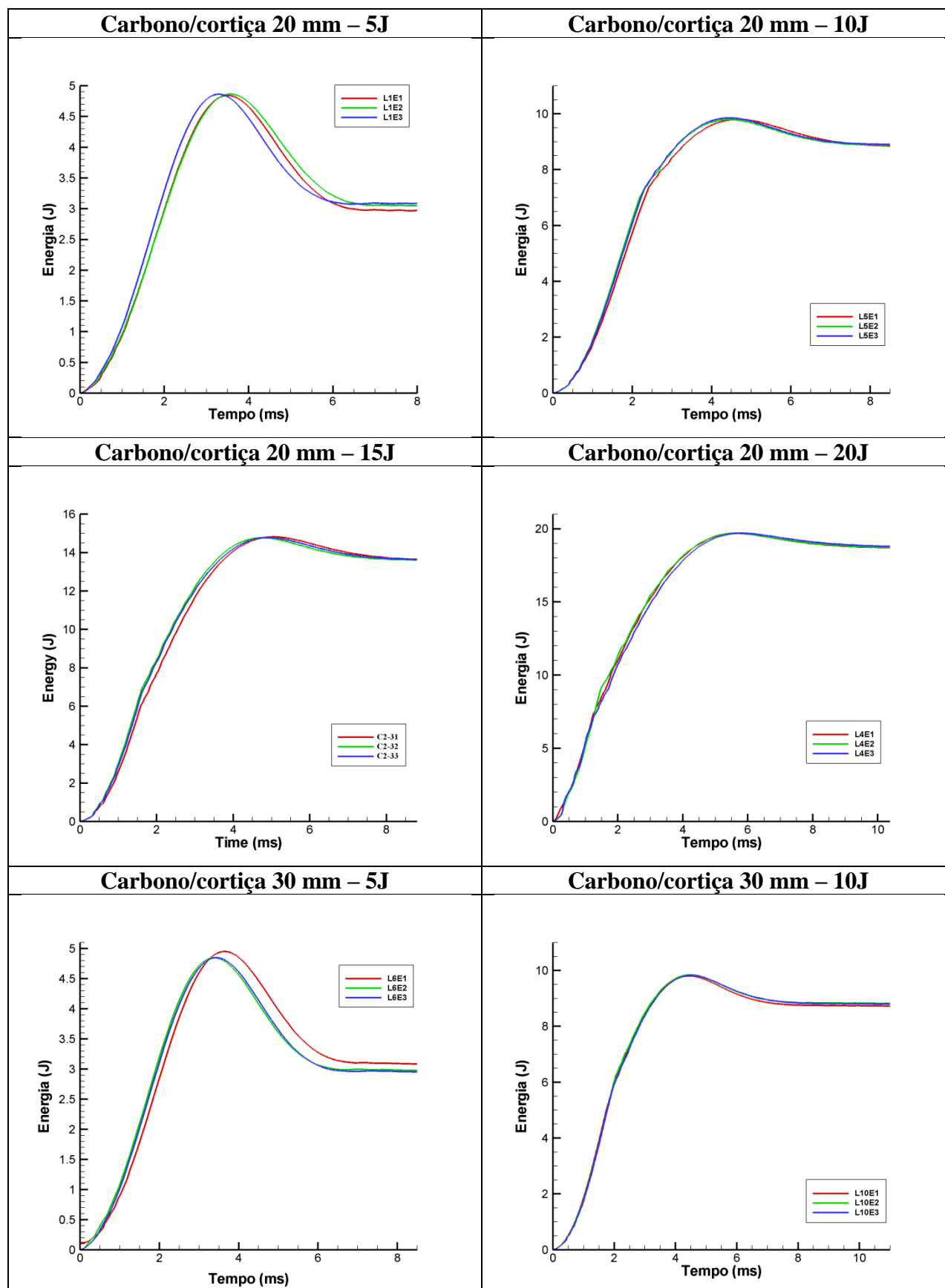


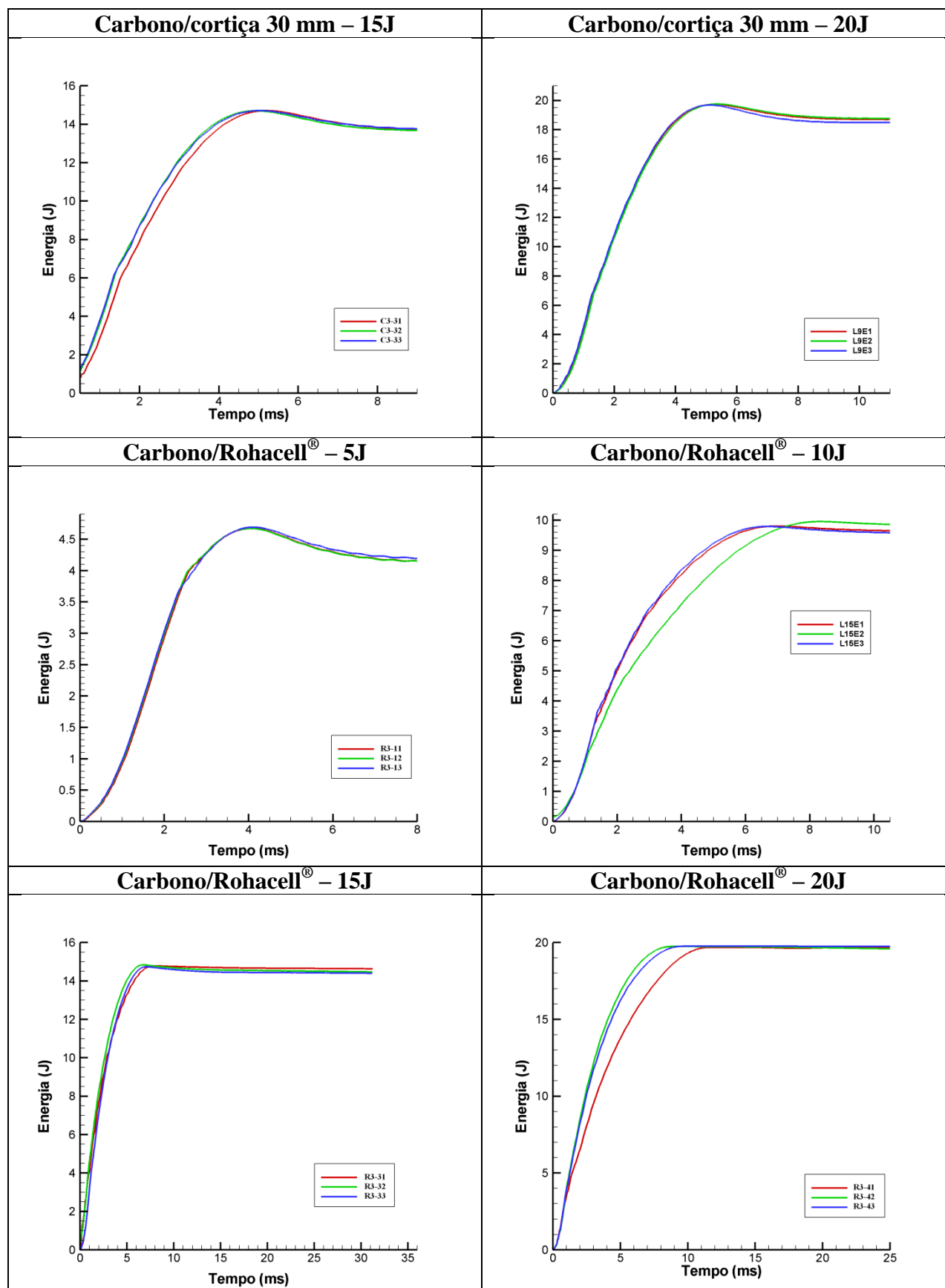
## Conjunto II – Curvas força-deslocamento





## Conjunto III- Curvas energia-tempo





**Conjunto IV- Curvas deslocamento-tempo**